

УДК 666.198

## **Плазменная обработка древесины**

**Г.Г. Волокитин<sup>1</sup>, Н.К. Скрипникова<sup>1</sup>, В.А. Сеницын<sup>2</sup>, О.Г. Волокитин<sup>1</sup>,  
В.В. Шеховцов<sup>1</sup>, С.П. Ващенко<sup>3</sup>, В.И. Кузьмин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>2</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>3</sup>*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: volokitin\_oleg@mail.ru

Разработана плазменная технология создания защитно-декоративного покрытия на поверхности деревянных образцов. Проведены экспериментальные исследования по нанесению защитного покрытия с помощью энергии низкотемпературной плазмы, а также исследования распределения температурных полей по сечению обрабатываемого изделия и сравнения полученных расчетных результатов с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** электроплазменная установка, обработка поверхности древесины, защитно-декоративное покрытие, температурные поля.

### **Введением**

На рынках отделочных материалов все большее число потребителей отдают свои предпочтения изделиям из древесины, нежели искусственным продуктам. Этот факт легко объяснить: дерево изначально является экологически чистым продуктом и имеет значительные преимущества с эстетической точки зрения. Более того, древесина в отличие от металлов и сырья для пластмасс является восстанавливаемым ресурсом, запасы которого при грамотном использовании оказываются неисчерпаемыми.

Разбухание древесины во влажной среде и ее подверженность воздействию грибкам и различным биологическим поражениям привели к необходимости предварительной обработки ее поверхности. В плане такой обработки эффективным является использование энергии низкотемпературной плазмы для создания защитно-декоративного покрытия на поверхности любых пород древесины. После обработки материал сохраняет свои экологические качества, одновременно улучшаются его физико-механические характеристики и декоративные свойства.

При воздействии на поверхность изделий из древесных пород низкотемпературной плазмой происходит образование полированного слоя, обладающего высокими эксплуатационными свойствами, такими как: снижение водопроницаемости; уничтожение грибковых заболеваний древесины, плесени; прекрасное проявление текстуры древесины и цвета (золотисто-коричневый); повышенная стойкость к истиранию.

### Задачи исследований

Применение среды низкотемпературной плазмы позволяет модифицировать поверхность древесины и получить тончайшую функциональную (гидрофобную) пленку, которая улучшает физические свойства материала и не пропускает жидкость. Кроме того, скорость обработки поверхности составляет порядка 40 м<sup>2</sup>/час, что делает процесс создания защитно-декоративного покрытия экономически выгодным.

Целью настоящей работы является: разработка устройства, обеспечивающего создание защитно-декоративного покрытия на поверхности древесины с использованием энергии низкотемпературной плазмы; проведение исследований распределения температурных полей по сечению обрабатываемого изделия и сравнения полученных расчетных результатов с экспериментальными данными.

### Эксперимент

Основные эксперименты по обработке древесины проводились на электроплазменной установке [1]. Установлено, что глубина слоя, модифицированного плазмой, составляет 1–2 мм и зависит от мощности плазмотрона и скорости обработки. Значение толщины слоя пропорционально глубине проникновения опасных температурных полей, при которых происходит деструкция материала. В таблице приведены результаты термического воздействия на исследуемые образцы при различных тепловых потоках и времени воздействия плазмы. Из приведенных данных следует, что оптимальными режимами обжига для получения необходимых эксплуатационных характеристик обрабатываемой поверхности являются величины теплового потока  $(1,8–2,6) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и времени воздействия 1–2 с. После плазменной обработки древесины в этом режиме поверхность окрасилась и приобрела темный, золотисто-коричневый цвет, при этом очень хорошо проявилась текстура породы и стали более заметными годовые кольца, содержание влаги в древесине, обработанной плазмой, сократилось.

Поверхность после обработки является более устойчивой к появлению грибов, плесени и других пороков древесины за счет удаления подходящей для их формирования среды. Кроме того, образцы древесины после термической обработки впитывают воду в несколько раз медленнее, чем исходные породы [2].

Таблица

Режимы получения защитно-декоративного покрытия на древесине

Мощность плазмотрона, кВт	Сила тока, А	Напряжение, В	Удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	Время воздействия плазмы, с	Характеристика оплавленной поверхности	Цвет поверхности
20,8	130	160	$1,1 \cdot 10^6$	3	недожог поверхности	светло-коричневый
23,8	140	170	$1,5 \cdot 10^6$	2	частичный недожог поверхности	светло-коричневый
35,2	200	176	$1,8 \cdot 10^6$	1	равномерное проникновение — глубина 1 мм	светло-коричневый
35,2	200	176	$1,8 \cdot 10^6$	2	равномерное проникновение — глубина 1 мм	золотисто-коричневый
35,2	200	176	$1,8 \cdot 10^6$	3	частичный пережог	темно-коричневый
56	400	140	$2,6 \cdot 10^6$	1	равномерное проникновение — глубина 2 мм	золотисто-коричневый
56	400	140	$2,6 \cdot 10^6$	2	равномерное проникновение — глубина 2 мм	темно-коричневый
58,8	420	140	$2,8 \cdot 10^6$	1	частичный пережог	темно-коричневый
58,8	420	140	$2,8 \cdot 10^6$	2	пережог поверхности	черный
59,4	440	135	$3,0 \cdot 10^6$	1	пережог поверхности	черный

Помимо экспериментов с воздействием на поверхность древесины плазменной дуги (токонесущая плазменная струя), также была проведена серия опытов по поверхностной обработке древесины ламинарными и турбулентными потоками воздушной плазмы, генерируемой электродуговым плазмотроном линейной схемы с секционированной межэлектродной вставкой [3]. Электрическая мощность плазмотрона составляла около 52 кВт. Так как плазмотрон оснащен узлом кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой, то в экспериментах, в качестве транспортирующего и фокусирующего газов, в него подавалась смесь воздуха и пропан-бутана (без подачи порошка) и, соответственно, дополнительное энерговыделение от сгорания пропан-бутана составляло от 17 до 30 кВт.

Необходимо отметить, что вследствие существенных отличий интегральных и удельных тепловых потоков, динамических давлений от струи плазмы при ее ламинарном и турбулентном режимах истечений, указанные режимы обеспечивали существенные отличия текстуры обработанных поверхностей.

Ламинарные потоки плазмы существенно превосходят турбулентные струи по удельным тепловым потокам. Исследования теплообмена плазменных струй с нормально установленной плоской преградой [4] показали, что плотность теплового потока на оси ламинарной струи плазмы соизмерима с лазерным излучением и даже на значительной дистанции от среза сопла (72 мм) может достигать  $12 \text{ МВт/м}^2$ . Что касается текстуры обработанной древесины, то наиболее ярко она проявляется при использовании ламинарных режимов истечения плазменных струй.

Скорость перемещения плазмотрона при плазмоструйной обработке древесины достигала 200 мм/с. При этом, до определённых размеров образцов (в экспериментах до поперечных сечений  $60 \times 60$  мм) происходило обтекание образца потоком плазмы и, соответственно, осуществлялась одновременная обработка всех поверхностей. Так же без поперечных колебаний плазмотрона осуществлялась обработка плоских образцов. В проведенных экспериментах ширина плоских образцов достигала 150 мм. Растекание плазменного потока вдоль поверхности обеспечивало обработку образцов сразу на всю ширину.

Необходимо отметить, что обработка древесины ламинарными потоками плазмы выгодна и с точки зрения эффективности использования энергии плазменных струй. В проведенных ранее экспериментах [4] к.п.д. нагрева поверхности при натекании ламинарной струи плазмы на плоскую преграду достигал 97 %.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективности плазмоструйной обработки изделий из древесины.

### Моделирование

Несмотря на то, что вопросам взаимодействия плазмы с твердым телом посвящен ряд работ [2, 5, 6], в них практически отсутствуют сообщения по определению температурных полей по сечению обрабатываемого низкотемпературной плазмой материала из дерева при разных значениях мощности дугового разряда. В данном разделе проведено исследование температурных полей по сечению обрабатываемого изделия и сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными. Необходимость установления значений температур по сечению изделия связано с изучением физико-химических превращений, происходящих в основе изделий при тепловом воздействии, которые определяют прочность сцепления покрытий с основой, химическую стойкость, водопоглощение и морозостойкость. При обработке поверхности деревянного изделия низкотемпературной плазмой были приняты два допущения: 1) тепловой поток одновременно воздействует на всю поверхность изделия; 2) тепловой поток воздействует на поверхность изделия в данной точке в момент прохождения столба электрической дуги, при этом электрическая дуга рассматривается как поверхностный источник тепла

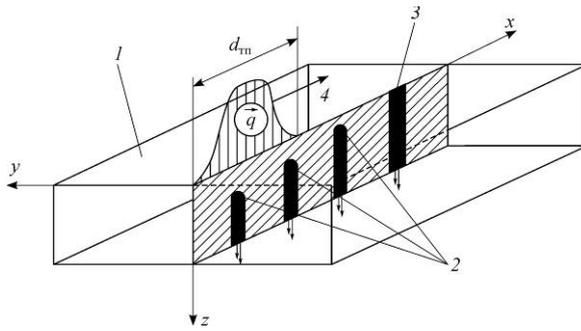


Рис. 1. Схема объекта математического моделирования.

$q(x, t)$  — распределенный тепловой поток (источник контрольного воздействия),  $d_m$  — диаметр теплового пятна; 1 — образец материала (исследуемый объект), 2 — термопары, 3 — датчик теплового потока, 4 — направление движения теплового потока.

конечной ширины (пятно контакта) с неоднородным распределением плотности теплового потока. При-

нятое в первом случае допущение [5] связано с малостью времени теплового воздействия, не превышающего 1 с, и с достаточно большой теплоинерционностью изделия ( $Bi = 1,2 \div 15,4$ ). При постоянных теплофизических свойствах изделия задача определения температурного поля в нем сводится к решению уравнения теплопроводности (схема области взаимодействия потока приведена на рис. 1).

Рассматривается краевая задача высокотемпературного теплопереноса при воздействии плазменной струи на поверхность обрабатываемого изделия из древесины (рис. 2). В схеме приняты следующие обозначения:  $h$  — высота пластины,  $l$  — продольный размер пластины.

При моделировании процесса взаимодействия предполагалось, что теплофизические характеристики материала пластины не зависят от температуры, радиационный теплообмен на поверхности пластины незначителен, возможные процессы плавления и окисления материала пластины активными компонентами плазменного потока не учитываются, скорость потока дозвуковая, режим течения ламинарный. В такой постановке анализируемый процесс описывается нестационарным уравнением теплопроводности с подвижным граничным условием воздействия теплового потока на поверхность материала пластины.

Задача распределения температурного поля за время действия  $\tau_k$  теплового потока  $q$  сводится к решению нестационарного двумерного уравнения теплопроводности в декартовой системе координат с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho c_p \partial T(x, z, t) / \partial t = \lambda [\partial^2 T(x, z, t) / \partial x^2 + \partial^2 T(x, z, t) / \partial z^2]. \quad (1)$$

Начальное условие характеризует распределение температуры в объеме в момент времени  $t = 0$  и имеет вид:

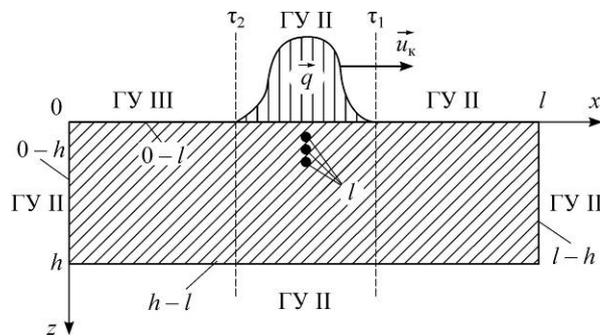
$$t = 0, 0 \leq x \leq l, 0 \leq z \leq h: T(x, z, t) = T_0. \quad (2)$$

Граничные условия (ГУ) описывают тепловые режимы на границах рассматриваемого тела. При этом на границах  $0-h$  и  $l-h$  (рис. 2) принимается отсутствие потока тепла

$$\lambda \partial T / \partial x = 0. \quad (3)$$

На противоположной тепловоспринимающей поверхности  $h-l$  задается соотношение,

Рис. 2. Схема области решения.  $u_k$  — вектор скорости перемещения теплового потока,  $\tau_1$  — момент начала теплового воздействия,  $\tau_2$  — момент окончания теплового воздействия.



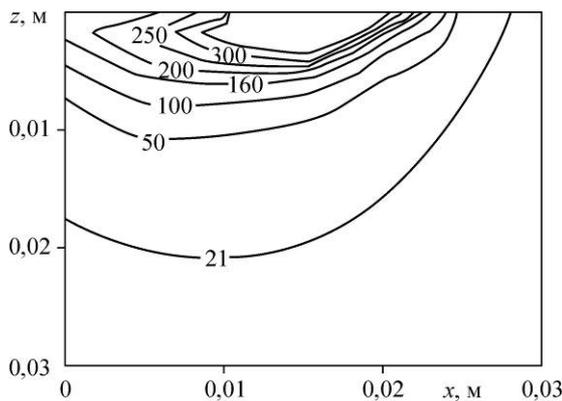


Рис. 3. Температурное поле в момент времени 0,1 с.

связывающее значение температуры с величиной теплового потока, являющееся граничным условием третьего рода (ГУ III)

$$-\lambda \partial T / \partial z = \alpha_e (T - T_e). \quad (4)$$

На тепловоспринимающей поверхности 0-*l* приняты сложные граничные условия, зависящие от времени и координат. Условно разделим

тепловое воздействие на поверхности 0-*l* на три периода: первый, при  $\tau_1 > t > 0$ , характеризуется отсутствием потока тепла и описывается граничным условием второго рода (ГУ II) (3); на втором, при  $\tau_2 > t > \tau_1$ , тепловое состояние поверхности определяется величиной плотности распределенного по поверхности теплового потока, в этом случае ГУ II запишется в виде

$$-\lambda \partial T / \partial z = q(x, t), \quad (5)$$

здесь распределение относительной плотности теплового потока движущегося источника тепла описывается гауссовой зависимостью [4]

$$q(x, t) = q_{\max} \left( 1, 253 / \sqrt{\pi} / 2 \right) \exp \left( -2 \left[ (x - u_k t) / 1, 197 \right]^2 \right), \quad (6)$$

где  $q_{\max}$  — плотность теплового потока в центре пятна контакта. В третьем периоде, при  $t > \tau_2$ , происходит охлаждение поверхности в условиях естественной конвекции, и граничное условие тепловоспринимающей поверхности 0-*l* приобретает вид (4).

При определении коэффициента теплоотдачи использовались эмпирические зависимости для теплообмена в условиях естественной конвекции на вертикально расположенной пластине [5].

Для численного решения поставленной задачи использовался метод конечных разностей [7]. Дифференциальное уравнение (1) аппроксимировалось неявной трехточечной схемой. Диффузионные члены аппроксимировались центральной схемой второго порядка. Система линейных алгебраических уравнений решалась методом трехточечной прогонки. Метод и алгоритм численного решения тестировались на последовательности сгущающихся сеток. Вычисления проводились при сеточных параметрах, дальнейшее уменьшение которых не приводило к заметным отклонениям результатов вычислений.

Численное исследование процесса теплопереноса между плазменным потоком, сканирующем поверхность материала, и окружающей средой проведено при следующих значениях параметров: начальная температура  $T_0 = 300$  К, температура окружающей среды  $T_e = 300$  К, плотность теплового потока от плазмы с поперечным размером пятна контакта  $d_{\text{пп}} = 5$  мм составляла  $q_{\max} = (1 \div 3) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, скорость перемещения теплового потока  $u_k = 200$  мм/с. Теплофизические характеристики имели значения:  $c_p = 1,9$  Дж/(кг·град),  $\lambda = 1,4$  Вт/(м·град),  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>, геометрические характеристики были следующими:  $l = 0,15$  м,  $h = 0,05$  м. Результаты расчета представлены на рис. 3–5.

### Результаты исследований и их обсуждение

Сформировавшееся в результате плазменного воздействия температурное поле в материале соответствует диапазону температур 200÷300 °С в приповерхностном слое

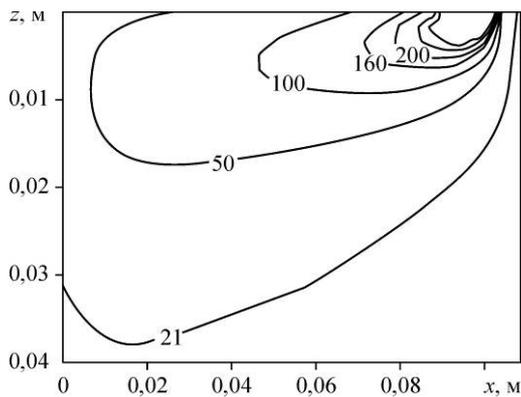


Рис. 4. Температурное поле в момент времени 0,5 с.

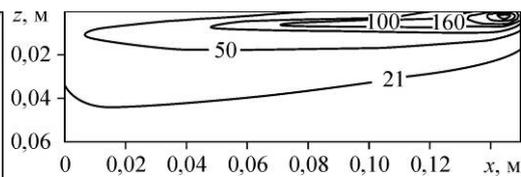


Рис. 5. Температурное поле в момент времени 0,8 с.

глубиной 5 мм от внешней поверхности воздействия. Глубина и температурный диапазон области прогрева обеспечивают формирование гидрофобной пленки на поверхности древесины и препятствуют образованию пороков внутри древесины благодаря интенсивному удалению влаги и лигнина. При этом структура обработанной поверхности является однородной — без наличия трещин, без локальных участков пережога, и характеризуется равномерной полимеризацией и архитектурной выразительностью. Полученный материал с новыми свойствами обеспечивается технологией плазменной обработки, а именно двумя параметрами — интенсивностью теплового потока и временем воздействия, которое регулируется скоростью продвижения транспортной ленты.

### Выводы

Рассматриваемые параметры технологии были определены серией теоретических экспериментов, оптимальные результаты которых экспериментально подтвердились физико-механическими и физико-химическими данными исследований структуры поверхности материала. Полученные параметры плазменной обработки позволяют в качестве исходных изделий использовать древесину любых пород.

Для создания промышленной технологии и поточных линий плазменной обработки деревянных изделий необходимо проведение дополнительных технологических экспериментов и опытно-конструкторских работ.

### Список литературы

1. Волокитин О.Г., Цветков Н.А., Волокитин Г.Г. Перспективы технологии создания защитно-декоративных покрытий на поверхности древесины с использованием плазменной технологии // Вестник ТГАСУ. 2012. № 1. С. 112–116.
2. Пат. 2484951 РФ, МПК51 В27К5100. Способ получения защитно-декоративного покрытия на древесине / Волокитин О.Г., Цветков Н.А., Волокитин Г.Г., Черкашина Н.А.; заявитель и патентообладатель Томский гос. архит.-строит. ун-тет; № 2012104467/13; заявл. 08.02.2012; опубл. 20.06.2013.
3. Михальченко А.А., Кузьмин В.И., Картаев Е.В., Наливайко В.И., Чубаков П.А. Определение температуры в струе, истекающей из плазматрона с МЭВ, по молекулярному спектру азота // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 657–669.
4. Кузьмин В.И. Плазмоструйная термообработка газотермических покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 1993. 197 с.
5. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шилаев А.М., Петроченко В.В. Плазменные технологии в строительстве. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2005. 291 с.
6. Никифоров А.А., Скрипникова Н.К., Маслов Е.А., Волокитин О.Г. Исследование плазменной технологии получения силикатных тугоплавких расплавов // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 159–163.
7. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2014 г.,  
после переработки — 17 марта 2015 г.