

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ

### MATHEMATICAL MODEL OF MODES OF LASER CUTTING OF BIRCH WOOD

In work are considered depth, speed and power of laser cutting wood of birch and regression analysis of the mathematical model

(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) [akwer@yandex.ru](mailto:akwer@yandex.ru)

Исследования процессов лазерного резания является актуальной задачей, решение которой позволит инженерам-технологам увеличить производительность лазерных станков путем использования оптимальных режимов резания.

Объект исследования – процесс лазерного резания древесины березы.

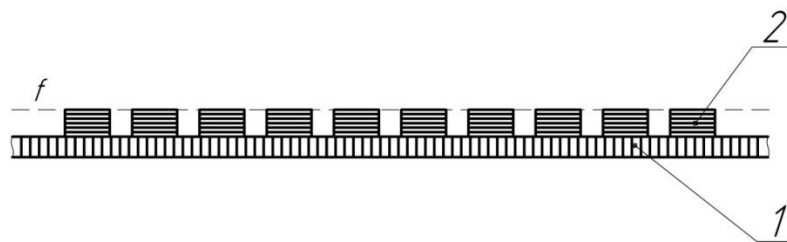
Цель исследования – нахождение зависимости глубины резания от мощности лазерного излучателя и скорости перемещения лазерного луча.

Экспериментальная установка включает в себя лазерно-гравировальный станок VL-4060, воздушный компрессор, ПК. ПО LaserCut 5.1, электронный штангенциркуль ЦИ 0-150 с ценой деления 0,01мм, набора щупов ГОСТ 882-75, поверхностный влагомер Hydro CONTROL, весы САРТО ГОСМ СЕ623-С.

Толщина заготовок древесины березы измерялась электронным штангенциркулем ЦИ 0-150 мм с ценой деления 0,01, с цифровым индикатором «ЭНКОР». Скорость движения технологической головки устанавливалась и контролировалась при помощи ПО LaserCut 5.1, глубина резания измерялась при помощи набора щупов ГОСТ 882-75 и штангенциркуля ЦИ 0-150 мм, с ценой деления 0,01.

Заготовки древесины березы представляют собой бруски с размерами 110x20x10 мм в количестве 15 шт. Образцы не имели пороков, были высушены и имели влажность 8-10 %, что проверялось контактным влагомером Hydro CONTROL. После взвешивания на весах весы САРТО ГОСМ СЕ623-С для эксперимента были выбраны образцы с одинаковой массой и одинаковой плотностью.

Заготовки укладывались на ячеистый стол станка, положение фокальной  $f$  плоскости было настроено на верхнюю поверхность (Рисунок 1) и в течение проведения эксперимента не изменялось. Все резы были сделаны поперек волокон древесины при одном направлении движения лазерной головки.

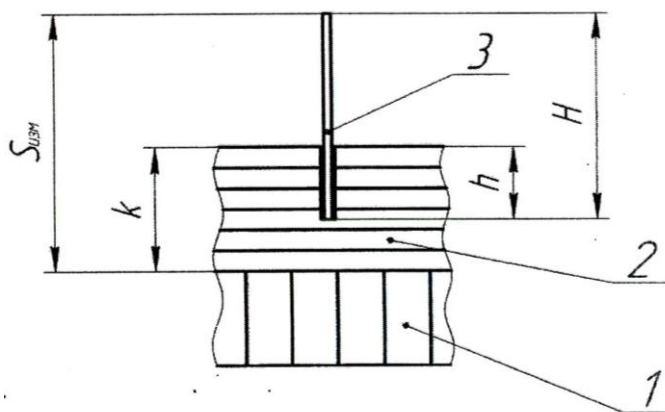


1-ячеистый стол лазерно-гравировального станка, 2- бруски древесины березы.

Рисунок 1 – Положение фокальной плоскости

Было проведено 750 резов с различными скоростно-мощностными режимами. Каждый режим был реализован 30 раз. В ходе проведения эксперимента скорость ступенчато менялась и составляла: 10, 12, 18, 41, 90 мм/с. Мощность ЛИ в ходе проведения эксперимента изменялась ступенчато и соответствовала: 21, 24, 30, 35, 38 процентам от максимальной мощности станка, составляющей 65 Вт. Обоснование указанного диапазона мощностей приведено в [5]. Каждому из пяти значений мощности ЛИ соответствовали пять значений скорости.

Измерения глубины реза образцов выполнялись с помощью щупа и штангенциркуля. В полученный рез, глубиной  $h$ , помещался щуп высотой  $H$  как показано на рисунке 2 и штангенциркулем измерялось расстояние  $S_{\text{изм}}$  от верхней поверхности брусков древесины березы до верхней поверхности щупа, а также высота брусков древесины березы.



Вычисление глубины реза образцов выполнялось с помощью формулы 1.

$$h = (k + H) - S_{\text{изм}} \quad (1)$$

При воздействии лазерного излучения на древесный материал глубина резания зависит от параметров: мощности лазерного излучателя, времени воздействия на материал. Формула глубины резания в общем случае известна уже длительное время (Формула 2).

$$h = \frac{2P}{\pi r_f \rho v_p (cT_{\text{и}} + L_{\text{и}})} \quad (2)$$

где  $P$  – мощность излучения, Вт;  $r_f$  – радиус фокусировки, мм;  $v_p$  – скорость резки, мм/с;  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, Дж/К;  $T_{\text{и}}$  – температура испарения материала, °С;  $L_{\text{и}}$  – удельная энергия испарения, кДж/кг.

Однако некоторые коэффициенты, используемые в случае резания древесины, на данный момент не известны. А, именно коэффициенты  $T_{\text{и}}$  – температура испарения материала,  $L_{\text{и}}$  – удельная энергия испарения.

Поскольку глубина резания зависит обратно пропорционально от скорости резания, что неудобно для построения регрессионной модели. Решили использовать другую величину – время воздействия лазерного луча на материал, которое напрямую зависит от скорости.

Постоянными факторами являются: влажность древесины 8-10 %, масса и плотность образцов.

Переменными факторами являются: время воздействия лазерного луча на материал, которое варьировалось от  $2,2 \leq t \leq 20$  мс, мощность лазерного излучения, которое варьировалось от  $22 \leq P \leq 38$  %.

Входными факторами являются: мощность лазерного излучения, время воздействия лазерного луча на материал.

Выходным фактором является глубина резания.

Оценочным показателем является глубина резания. Предполагаемая величина изменения ожидается в диапазоне от  $0 \leq y \leq 5$  мм.

Определение верхнего, нижнего и основного уровней факторов в натуральных и нормализованных обозначениях и интервалы их варьирования приведены в таблицах (1) и (2).

Таблица 1 Уровни и интервалы варьирования переменных факторов

Факторы	Шаг варьирования	Уровни варьирования факторов		
		Нижний	Основной	Верхний
Мощность лазерного излучения (X1), %	8,5	22	29,5	38
	1	-1	0	+1
Время воздействия лазерного луча (X2), мс	8,888	2,222	11,111	20
	1	-1	0	+1

Таблица 2 Рабочая матрица планирования ПФЭ 2<sup>k</sup> (по плану Коно)

Номер опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов		Значение выходной величины
	$P \cong X1, \text{Вт}$	$t \cong X2, \text{мс}$	X1	X2	
1	24,7	20	1	1	$Y_1$
2	13,65	20	-1	1	$Y_2$
3	24,7	2,(2)	1	-1	$Y_3$
4	13,65	2,(2)	-1	-1	$Y_4$
5	24,7	11,(1)	1	0	$Y_5$
6	13,65	11,(1)	-1	0	$Y_6$
7	19,5	20	0	1	$Y_7$
8	19,5	2,(2)	0	-1	$Y_8$
9	19,5	11,(1)	0	0	$Y_9$

По результатам экспериментальных исследований глубины резания в зависимости от мощности и времени воздействия лазерного излучения на древесину березы составили таблицу (3).

Таблица 3 Результаты экспериментальных исследований глубины резания в зависимости от мощности и времени воздействия лазерного излучения

Номер опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов		Значение выходной величины
	$P \cong X1, \text{Вт}$	$t \cong X2, \text{мс}$	X1	X2	
1	24,7	20	1	1	1,66676
2	13,65	20	-1	1	0,45235
3	24,7	2,(2)	1	-1	0,29176
4	13,65	2,(2)	-1	-1	0,04735
5	24,7	11,(1)	1	0	1,15029
6	13,65	11,(1)	-1	0	0,20971
7	19,5	20	0	1	1,35735
8	19,5	2,(2)	0	-1	0,23324
9	19,5	11,(1)	0	0	0,95293

Для построения математической модели (уравнения регрессии) глубины лазерного резания березы в зависимости от мощности и времени воздействия лазерного излучения определили коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ .

$$b_0 = 0,912;$$

$$b_1 = 0,4;$$

$$b_2 = 0,484;$$

$$b_{11} = -0,211$$

$$b_{22} = -0,96$$

$$b_{12} = 0,243$$

Методом подстановки получили экспериментально уравнение регрессии по расчету глубины лазерного резания древесины березы на лазерно-гравировальном станке и представлено в виде математической модели в кодированном виде (3):

$$y = 0,912 + 0,4x_1 + 0,484x_2 - 0,211x_1^2 - 0,96x_2^2 + 0,243x_1x_2 \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3) наибольшее влияние на выходную величину (глубину) оказывает время воздействия лазерного излучения на древесину (фактор  $x_2$ ), имеющую наибольшее значение коэффициента. Это возможно связано с тем, что при увеличении времени усиливаются экзотермические реакции окисления древесины. При увеличении мощности лазерного излучения ( $x_1$ ) значение глубины увеличивается, что и ожидалось.

После провели перевод регрессионного уравнения (3) из кодированного вида в натуральный вид (4).

$$\begin{aligned} y &= 0,912 + 0,4 \frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} + 0,484 \frac{\tilde{x}_2 - 11, (1)}{8, (8)} - 0,211 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} \right)^2 - 0,96 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 11, (1)}{8, (8)} \right)^2 \\ &+ 0,243 \frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} \frac{\tilde{x}_2 - 11, (1)}{8, (8)} \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношение времени воздействия (мс) к скорости перемещения лазерного луча рассчитывали по формуле (5).

$$t = \frac{-0,2 \times 1000}{V} \quad (5)$$

где 0,2 мм - диаметр лазерного пятна на материале; 1000 - переводной коэффициент, переводящий в мс; V - скорость перемещения лазерного луча.

В итоге методом упрощения математическая модель приняла следующий вид (6).

$$H = -3,171 + 0,323P - \frac{4,213}{V} - 0,0078P^2 - \frac{48,6}{V^2} + \frac{1,051}{V} \quad (6)$$

где H - глубина реза, мм; P - мощность ЛИ, Вт; V - скорость перемещения лазерного луча, мм/с.

Экспериментальная формула 6 справедлива для определения глубины лазерного резания березы с влажностью 6-8% для станка VL4060 внутри интервала варьирования переменных факторов, приведенных в таблице 1.

#### Литература:

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. «Технологические процессы лазерной обработки» - Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006
2. Григорьянц А.Г. «Основы лазерной обработки материалов» - Москва, 1989
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. «Физические процессы при лазерной обработке материалов» - Москва: Энергоатомиздат, 1985
4. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. «Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Конспект лекций» - Санкт-Петербург, 2005
5. Кузнецов А.И., Шимон Е.В., Новоселова М.В., Николаева Т.Ю. Определение действительного диапазона изменения мощности лазерного излучения станка vl4060. //

Деревообработка: оборудование, менеджмент XXI века. Труды VII международного евразийского симпозиума / Под научной ред. В.Г. Новоселова, 2012