

$$Y_{i+1} = (1 - \Delta t)U_i + 1 + \left( \frac{\tau^2}{6} + \frac{\tau\Delta t}{2} - \frac{\tau}{2} \right)W_{i+1} + \Delta tZ_{i+1}.$$

На АВМ реализуется передаточная функция ЭПОС с возможными изменениями параметров в заданном диапазоне. На ЦВМ моделируются пуск и останов АВМ, ввод аналоговой информации ( $Y_{\text{эксп}}$ ), задание начальных значений параметров и входного сигнала, реакция цифровой модели ( $Y_{\text{расч}}$ ), графическая регистрация результатов. Для реализации цифровой модели объекта применялся численный метод Эйлера–Коши. Минимизация целевой функции осуществлялась пошаговым методом.

Получены следующие значения параметров:  $T = 70$  с,  $K = 162$  и  $\tau = 10$  с для периода квантования  $\Delta t = 0,1$  с.

УДК 674.055:621.914

НГУЕН ХЫУ ЛОК, аспирант (БТИ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РЕЗАНИИ ДРЕВЕСИНЫ ТРОПИЧЕСКИХ ПОРОД

Анализ существующих теорий резания древесины позволил высказать соображения о том, что изучение процесса прямолинейного резания древесины необходимо, чтобы получить представление о сложном резании и установить его физические основы. Было выполнено очень ограниченное количество исследований по прямолинейному резанию. Исследование прямолинейного резания носит фрагментарный, чисто эмпирический характер, затрудняя тем самым полноценное обобщение результатов опытов, а также проверку достоверности различных теоретических положений. В проведенных исследованиях мало внимания уделялось качественной стороне процесса прямолинейного резания, особенно древесины тропических пород.

В связи с этим вопрос, который подлежит изучению в нашей работе, заключается в том, чтобы, используя современный метод планирования эксперимента, исследовать качество поверхности при прямолинейном резании древесины тропических пород. В результате экспериментов можно получить математические модели зависимости параметра шероховатости поверхности от технологических факторов, что является основой для решения задачи оптимизации процесса резания.

По ГОСТ 7016–82 шероховатость поверхности древесины и древесных материалов характеризуется числовыми значениями параметров неровностей, а также наличием или отсутствием ворсистости и мшистости на обработанных поверхностях. В качестве параметров шероховатости принимаются  $R_{z\max}$ ,  $R_z$ ,  $R_a$  и  $S_z$ . Однако  $S_z$  служит вспомогательным и применяется с одним из параметров  $R_{z\max}$ ,  $R_z$  или  $R_a$ . Параметр  $R_{z\max}$  считается основным и практически единственно приемлемым во всех случаях параметром оценки шероховатости, когда доминирующими неровностями являются неровности разрушения. По данному параметру по ГОСТ 7016–82 устанавливается класс шероховатости.

Исследование проведено на специально созданной экспериментальной установке, сконструированной на базе фрезерного станка по металлу (марка станка 675П). Скорость резания осуществляли перемещением образца, закрепленного в специальных дисках горизонтального суппорта.

Режущий инструмент изготавлили из стали 8Х6НФТ, затупление режущей кромки которого осуществляли искусственным путем.

Обрабатываемые материалы из красного дерева и породы Соан Дао (Xoan Dao, научное название — *Rygeum arboreum*). Плотность красного дерева —  $\gamma = 0,8 \text{ г/см}^3$ , породы Соан Дао —  $\gamma = 0,46 - 0,56 \text{ г/см}^3$ ; влажность красного дерева  $W = 12,4 \%$ , породы Соан Дао —  $W = 11 \%$ . Параметр шероховатости поверхности резания измеряли на приборе МИС-11 и методом теневого сечения с применением прибора ТСП-4.

В качестве варьируемых факторов с учетом проведенных исследований выбрали радиус затупления режущей кромки  $r$ , толщину снимаемого слоя  $h$ , угол заострения  $\beta$  и угол между вектором скорости резания и направлением волокна в плоскости резания (угол скоса волокон  $\varphi_c$ ). Диапазоны варьирования этих факторов указаны в табл. 1. При увеличении значения угла скоса волокон  $\varphi_c$  от 0 до  $90^\circ$  процесс резания из продольного переходит в поперечное, поэтому для определения влияния угла  $\varphi_c$  на шероховатость поверхности резания разделим фактор  $\varphi_c$  на 2 диапазона — от 0 до  $60^\circ$  и от  $60$  до  $90^\circ$ .

Исследование проводится при постоянных величинах: скорость резания  $v = 6,557 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  и задний угол  $a = 5 \text{ град}$ .

Формулы, связывающие нормализованные (кодированные) и натуральные обозначения факторов, в данном случае имеют вид:  $x_1 = (h - 0,4) / 0,3$ ;  $x_2 = (r - 20) / 15$ ;  $x_3 = (\beta - 45) / 15$ ;  $x_4 = (\varphi_c - 30) / 30$  и  $x_4 = (\varphi_c - 75) / 15$ .

В качестве регрессионной модели выбираем В-план второго порядка типа  $B_k$ . План такого типа по сравнению с другими оказался очень удобным для эксперимента в деревообработке из-за простоты применения и точности получаемой модели.

Таблица 1. Факторы и уровни варьирования

Факторы	Обозначение		Уровень варьирования			Интервал варьирования
	натуральное	кодированное	нижний	основной	верхний	
Толщина снимаемого слоя, мм	$h$	$x_1$	0,1	0,4	0,7	0,3
Радиус затупления режущей кромки, мкм	$r$	$x_2$	5,0	20	35	15
Угол заострения, град	$\beta$	$x_3$	30	45	60	15
Угол скоса волокон, град	$\varphi_c$	$x_4$	0	30	60	30
			60	75	90	15

Для увеличения точности регрессионной модели вблизи центра план может быть дополнен одним или несколькими опытами  $\Delta n_0$  (в нашей работе  $\Delta n_0 = 2$ ), т.е. опытами, поставленными в условия  $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$ . Эти опыты улучшают точность модели в центре плана, особенно для модели, которая по результатам эксперимента служит для оптимизации объекта.

Общее число опытов определяется по формуле

$$N = 2^k + 2k + \Delta n_0,$$

где  $k$  – число варьируемых факторов (при  $k = 4 N = 26$ ).

В общем виде регрессионная модель

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<4; i, u=1}^k b_{iu} x_{iu}.$$

Коэффициенты регрессионной модели рассчитываются по следующим формулам:

$$b_0 = (T_1 - T_2) \sum_{j=2}^{2k+2k} y_j + (T_1 - 4T_2) \sum_{j=1}^{2k} y_j;$$

$$b_i = T_3 \sum_{j=1}^{2+2k} x_{ij} y_j;$$

$$b_{ii} = -b_0 + T_4 \sum_{j=2}^{2k+2k} x_{ij}^2 y_j;$$

$$b_{ij} = T_6 \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{uj} y_j.$$

Значения коэффициентов  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_6$  при отсутствии опытов в центре плана приведены в работе [1]:  $T_1 = 0,22917$ ;  $T_2 = 0,0625$ ;  $T_3 = 0,0556$ ;  $T_4 = 0,5$ ;  $T_5 = -0,10417$ ;  $T_6 = 0,0625$ .

Дисперсии коэффициентов регрессии и ковариации между ними определяются из работы [2].

Если в центре плана  $B_k$  поставлено  $\Delta n_0$  дополнительных опытов, то это вызывает изменение следующих оценок:

$$\Delta b_0 = (\bar{y}_0 - b_0) \Delta_n T_1;$$

$$\Delta s^2 \{b_0\} = -\Delta_n (T_1^2/n) s^2 \{y\};$$

$$\Delta b_{ii} = -(\bar{y}_0 - b_0) \Delta_n T_2;$$

$$\Delta s^2 \{b_{ii}\} = -\Delta_n (T_2^2/n) s^2 \{y\};$$

$$\Delta \text{cov} \{b_0, b_{ii}\} = -\Delta_n (T_2 T_1/n) s^2 \{y\};$$

$$\Delta \text{cov} \{ b_{ij}, b_{iu} \} = \Delta_n (T_2^2/n) s^2 \{ y \},$$

где  $s^2 \{ y \}$  — дисперсия воспроизводимости;  $\bar{y}_0$  — среднее значение выходной величины в центре плана;  $n$  — число дублированных опытов;

$$\Delta_n = \Delta n_0 / (1 + \Delta n_0 T_1).$$

До основных экспериментов проведены предварительные эксперименты, состоящие из 40 опытов, по результатам которых была проверена гипотеза о нормальном распределении выходной величины по критерию  $\chi^2$  Пирсона. На основе этих данных рассчитано необходимое число дублированных опытов, которое оказалось равным восьми, т.е. каждый опыт повторялся 8 раз. Значения выходной величины, усредненные по восьми дублированным опытам каждой серии:

$$y_j = \sum_{u=1}^8 y_{ju} / 8.$$

После проведения основных экспериментов определим значение коэффициентов регрессии математической модели.

По критерию Кохрена проверяется однородность дисперсий опытов:

$$G_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{max}}^2}{N} - \frac{\sum_{j=1}^n s_j^2}{n}.$$

Если все значения  $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}} = 0,13$ , то можно принять гипотезу об однородности дисперсии. Это позволяет оценить дисперсии воспроизводимости как среднее арифметическое дисперсий опытов.

После определения дисперсий коэффициентов регрессии и ковариации находим незначимые коэффициенты. После отбрасывания этих коэффициентов регрессионные модели имеют следующий вид:

для красного дерева при  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$

$$y_1 = 84,5 + 11,3x_1 + 12,5x_2 + 8,1x_3 + 7,7x_4 + 7,9x_1^2 - 9,3x_3^2 + 5,8x_1x_2 + 5,6x_1x_3;$$

для красного дерева при  $\varphi_c = 60 \div 90^\circ$

$$y_2 = 181,1 + 31,1x_1 + 13,9x_2 + 11,8x_3 + 49,9x_4 - 21,2x_1^2 - 24,1x_4^2 + 4,4x_1x_3 + 19,5x_1x_4 + 4,2x_2x_3;$$

для породы Соан Дао при  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$

$$y_3 = 96,6 + 9,3x_1 + 7,7x_2 + 5,9x_3 + 13,7x_4 - 5,7x_3^2 + \\ + 5,8x_4^2 + 4,7x_1x_3 + 2,2x_1x_4 + 3,1x_2x_3;$$

для породы Соан Дао при  $\varphi_c = 60 \div 90^\circ$

$$y_4 = 215,6 + 24,0x_1 + 21,0x_2 + 17,4x_3 + 64,4x_4 - 12,2x_1^2 - 9x_3^2 - \\ - 19,7x_4^2 + 7,0x_1x_3 + 11,0x_1x_4 + 13,1x_2x_3 + 11,2x_3x_4.$$

Проверка гипотезы регрессионных моделей об адекватности по F-критерию Фишера подтвердила высокую степень их достоверности.

Анализ результатов исследований показал следующее.

1. Уравнения регрессии при угле скоса волокон  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$  имеют соотношение  $\sum_{i=1}^k b_{ii} \rightarrow 0$ ; следовательно, можно использовать план первого порядка (полного факторного плана) для выделения зависимости параметра шероховатости поверхности от технологических факторов, т.е. линейная модель будет адекватной.

2. При увеличении значений  $h$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  и  $\varphi_c$  шероховатость поверхности ухудшается. Однако степени их влияния различны при  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$  и  $\varphi_c = 60 \div 90^\circ$ . При  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$  степени влияния всех факторов почти одинаковы (для красного дерева  $\Delta R_{z\max}$  равно соответственно 52,3; 49,4; 52,3; 21,7 мкм; для породы Соан Дао — 39,7; 30,6; 29,9; 36,0 мкм). При  $\varphi_c = 60 \div 90^\circ$  большое влияние на шероховатость оказывает угол скоса волокон  $\varphi_c$  ( $\Delta R_{z\max} = 124,5$  и 188,4 мкм), второстепенное влияние — толщина снимаемого слоя  $h$  (104,2 и 85,8 мкм), следующий фактор — радиус затупления режущей кромки  $\rho$  (49,4 и 82,8 мкм) и последний — угол заострения  $\beta$  (52,3 и 59,0 мкм).

3. При увеличении угла скоса  $\varphi_c$  от 60 до  $90^\circ$   $R_{z\max}$  быстро увеличивается и достигает максимального при  $\varphi_c = 90^\circ$ , который соответствует процессу поперечного резания древесины. При  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$  для всех пород влияние угла  $\varphi_c$  на шероховатость незначительное. Это можно объяснить тем, что механизмы стружкообразования различны. При  $\varphi_c = 0 \div 60^\circ$  предпочтение отдаляем сливной стружке. С увеличением  $\varphi_c$  до  $90^\circ$  вследствие слабой связи поперечных волокон образуются стружка скальвания в виде отдельных элементов и стружка отрыва в виде не связанных между собой элементов, а также появляются характерные вырывы ниже плоскости резания.

#### Литература

- Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., 1981.
- Пижурин А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М., 1984.