

При определении массы порошковой смеси можно воспользоваться формулой [5]

$$m = V \rho_{\text{п}} \rho_0 k_1 k_2 ,$$

где  $V$  – объем готового изделия;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность беспористого материала;  $\rho_0$  – относительная плотность изделия;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий потери массы порошка при наплавке;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий потери массы порошка в результате выгорания примесей.

Нагрев инструмента осуществляют до температуры плавления порошковой смеси на установках ТВЧ модели ВЧГ-1-25/044 или других аналогичных установках. После остывания изделие шлифуется и затачивается. Технология изготовления режущих инструментов широкой номенклатуры разработана в БТИ имени С.М.Кирова.

#### Литература

1. Марчук Г.И. Маршруты технического прогресса // Наука и жизнь. 1985. № 8. С. 2–10.
2. Либенсон Г.А. Специальность: порошковая металлургия. М., 1987.
3. Вельк А.А. Дереворежущий инструмент для автоматических линий обработки кромок щитовых деталей мебели: Экспресс-информация (Отечеств. производств. опыт) / ВНИПИЭлеспром. М., 1987. Вып. 6: Мебель.4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., 1975.
5. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.И. Пористые порошковые материалы и изделия из них. Мн., 1987.

УДК 519.25  
УДК 674.005

А.П.ФРИДРИХ, Н.В.БУРНОСОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ДВУХЛЕЗВИЙНЫМИ РЕЗЦАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ Д-ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ

При экспериментальных исследованиях одной из важных проблем является выбор плана математического планирования эксперимента. Выбор того или иного плана в конкретной ситуации обосновывается соответствующими критериями. В настоящее время широко применяются планы второго порядка, близкие к Д-оптимальным (В-планы, Кифера, Коно, Хартли–Коно и др.). Они связаны с критериями получения наилучших оценок коэффициентов математической модели. Если задать вид регрессионной функции, то для данного плана можно выписать некоторую характеризующую его матрицу, называемую информационной матрицей  $M$ . Оценки коэффициентов уравнения регрессии, полученного после реализации данного плана, связаны с определятелем  $|M|$  матрицы. Причем лучшим оценкам соответствует больший определятель  $|M|$ . Согласно критерию Д-оптимальности, максимизируется определятель информационной матрицы, при этом средние по области планирования максимальная и минимальная дисперсии предсказанных значений регрессион-

Таблица 1. Матрица планирования при использовании Д-оптимальных планов

Число пере- менных фак- торов $K$	Переменные факторы				Номер блока $p$	Количество опытов				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		в каж- дом блоке	всего	единич- ных вза- имодей- ствий	парных взаи- модей- ствий	
						$n_e$	$N$	$n_e$	$n_p$	
3	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$		1	8	26	18	12	
	$\pm 1$	0	0		2	2				
	0	$\pm 1$	0		3	3				
	0	0	$\pm 1$		4	2				
	$\pm 1$	$\pm 1$	0		5	4				
	$\pm 1$	0	$\pm 1$		6	4				
	0	$\pm 1$	$\pm 1$		7	4				
	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	1	16				
	$\pm 1$	0	0	0	2	2				
	0	$\pm 1$	0	0	3	2				
	0	0	$\pm 1$	0	4	2				
4	0	0	0	$\pm 1$	5	2	56	42	32	
	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	0	6	8				
	$\pm 1$	$\pm 1$	0	$\pm 1$	7	8				
	$\pm 1$	0	$\pm 1$	$\pm 1$	8	8				
	0	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	9	8				

ной функции минимизируются [1]. Все это приводит к повышению степени точности экспериментальных математических моделей.

Задача построения Д-оптимальных планов с заданным числом наблюдений еще не решена, так как отсутствует методика расчета коэффициентов регрессии при их реализации. В связи с этим проведен расчет коэффициентов регрессии и получены зависимости для построения математических моделей при использовании Д-оптимальных планов. Матрица планирования для реализации Д-оптимальных планов с тремя и четырьмя переменными факторами представлена в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что матрица планирования состоит из полного факторного эксперимента (номера блоков 1 для всех случаев), звездных точек, т.е. когда один переменный фактор варьирует на двух уровнях, а остальные факторы находятся на основном (например, для  $K=3$  блоки 2, 3, 4) и дополнительных блоках, предусматривающих выполнение полного факторного эксперимента с числом переменных факторов ( $K=1$ ). Следует отметить, что в дополнительных блоках не участвующий переменный фактор находится на основном уровне (например, для  $K=4$  блоки 6, 7, 8 и 9).

Таким образом, матрицу планирования можно разделить на три вида. Осуществив реализацию полного факторного эксперимента, первый дает возможность получить для исследуемого процесса математическое описание первого порядка. Второй вид — сочетание блоков полного факторного эксперимента и звездных точек, представляет собой нечто иное, как разновидность

В-плана. В целом же сочетание этих двух видов и дополнительных блоков дает возможность получить третий вид методической сетки опытов — Д-оптимальный план. В общем виде коэффициенты регрессии определяются по формулам [1] :

для свободного коэффициента регрессии

$$b_0 = a \sum_{u=1}^N Y_u - b \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_i^2 Y_u;$$

для коэффициентов регрессии при значении переменных факторов в первой степени

$$b_i = c \sum_{u=1}^N X_i Y_u;$$

для коэффициентов регрессии при парных взаимодействиях переменных факторов

$$b_{ij} = d \sum_{u=1}^N X_i X_j Y_u;$$

для коэффициентов регрессии при значении переменных факторов во второй степени

$$b_{ii} = e \sum_{u=1}^N X_i^2 Y_u - f \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_i^2 Y_u - b \sum_{u=1}^N Y_u.$$

Для определения вспомогательных коэффициентов  $a, b, c, d, e, f$  проведен анализ методики расчета коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов, согласно которой сумма квадратов отклонений  $Y_u$  по сравнению со значениями выхода, предсказываемыми для тех же точек  $F_u$  уравнением регрессии с коэффициентами  $b_0, \dots, b_m$ , должна быть минимальной, и установлены закономерности определения вспомогательных коэффициентов. Например, для оценки среднего влияния любого переменного фактора в первой степени на выходную величину необходимо сложить значения этого фактора на верхнем уровне и вычислить сумму значений на нижнем уровне, сумму этих сумм разделить на количество опытов, когда данный фактор находится на верхнем и нижнем уровнях, т.е. на  $n_e$ . Таким образом, вспомогательный коэффициент  $c = 1/n_e$ . Аналогично получается и для парных взаимодействий:  $d = 1/n_n$ .

Несколько сложнее определить коэффициенты  $a, b, c, f$ , так как здесь следует выявить общие закономерности с учетом влияния всех переменных факторов, затем относительно одного, нас интересующего, исключить вклады влияния всех остальных. Нами проведены такие вычисления, в результате которых получены следующие формулы для расчета вспомогательных коэффициентов:

$$a = (n_e - n_n + Kn_n) / (N(n_e - n_n + Kn_n) - Kn_e^2);$$

$$b = n_e / (N(n_e - n_n + Kn_n) - Kn_e^2);$$

$$c = 1/n_e; d = 1/n_n; e = 1/(n_e - n_n);$$

$$f = (Nn_n - n_e^2) / (n_e - n_n)(N(n_e - n_n + Kn_n) - Kn_e^2).$$

Количество опытов в матрице планирования определяется по следующим формулам:

$$N = 2^K + 2^{K-1}K + 2K; n_e = 2^K + 2^{K-1}(K-1) + 2; n_n = 2^K + 2^{K-1}(K-2).$$

Дисперсии опытов при использовании Д-оптимальных планов

$$S^2 \{b_i\} = cS^2 \{Y\}; \quad S^2 \{b_{ij}\} = dS^2 \{Y\};$$

$$S^2 \{b_{ii}\} = (e - f)S^2 \{Y\}; \quad S^2 \{b_0\} = aS^2 \{Y\}.$$

Данная методика расчета математических моделей на основе Д-оптимальных планов использована при экспериментальных исследованиях силовых характеристик процесса резания древесины двухлезвийными резцами на фрезерно-брюсующих машинах серии БРМ. Цель исследования — выявить оптимальные конструктивные параметры фрез и условий резания. Переменными факторами являлись задний угол резания при длинной режущей кромке  $a_d$ , угол разворота резца на колонке фрезы  $\epsilon$  и толщина щепы  $S_{ш}$ . Для проведения экспериментальных работ была спроектирована и изготовлена специальная установка [2]. Конструкция ее позволяла изменять переменные факторы и контролировать постоянные (табл. 2).

Регистрировались суммарная касательная сила резания  $F_k$  и сила затягивания-отжима  $F_{o,3}$  резца, перпендикулярная к его плоскости вращения, а также давалась визуальная оценка стабильности процесса и качества продукции.

В результате осуществления плана экспериментальных работ получены следующие уравнения регрессии, отражающие зависимости регистрируемых сил от исследуемых факторов в виде полиномов второго порядка.

Для древесины сосны

$$F_k = 175,6 + 21,2X_1 + 112,3X_2 - 34,6X_3 + 4,8X_1X_2 - 3,9X_1X_3 - 9,9X_2X_3 - 33,3X_1^2 + 63,2X_2^2 + 54,4X_3^2;$$

$$F_{o,3} = 54,8 + 40,7X_1 + 25,1X_2 + 96,9X_3 + 28,1X_1X_2 + 6,1X_1X_3 + 8,8X_2X_3 + 55,4X_1^2 + 16,8X_2^2 - 98,4X_3^2;$$

для древесины березы

$$F_k = 218,1 + 21,3X_1 + 122,5X_2 - 43,2X_3 + 5,0X_1X_2 - 6,2X_1X_3 - 9,1X_2X_3 - 33,6X_1^2 + 57,3X_2^2 + 80,4X_3^2;$$

Таблица 2. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы в явном виде	в коди- рован- ном	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
		низкий	основной	верхний	
		-1	0	+1	
Угол разворота $\epsilon$ , град	$X_1$	2	7	12	5
Толщина щепы $S_{\text{щ}}$ , мм	$X_2$	3	5	7	2
Задний угол $a_d$ , град	$X_3$	0	5	10	5

$$F_{0.3} = 77,5 + 30,2X_1 + 39,0X_2 + 74,8X_3 + 21,8X_1X_2 + 3,9X_1X_3 + 10,0X_2X_3 + 31,3X_1^2 + 18,8X_2^2 - 79,5X_3^2.$$

Проверка гипотезы об адекватности полученных моделей с помощью  $F$ -критерия подтвердила высокую степень их достоверности. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Угол резания  $a_d$  резко влияет на силу затягивания-отжима. При уменьшении угла резания увеличивается отжим бруса, а при увеличении появляется затягивание. Критическим углом является угол  $3^\circ$ . Следовательно, реальный задний угол  $a_d$  не должен быть меньше этой величины для острых резцов. Для затупленных задний угол должен быть на  $1-2^\circ$  больше.

2. Угол разворота резца на колонке  $\epsilon$  влияет на усилия резания и качество щепы. С увеличением его свыше  $7^\circ$  появляются сколы элементов щепы с образованием глубоких вырывов на пласти бруса. Качество срезов торцов щепы резко ухудшается.

3. Толщина щепы в целом вызывает рост силы резания.

4. Можно рекомендовать следующие параметры резания: задний угол  $3-5^\circ$ , угол разворота  $2-3^\circ$  и толщину щепы  $3-5$  мм.

5. Для расчета мощности резания среднюю касательную силу резания при данных параметрах для сосны рекомендуется принимать  $200$  Н, для бересклета —  $250$  Н.

6. Предложенная методика планирования экспериментальных работ и расчета коэффициентов регрессии при использовании Д-оптимальных планов позволяет при сравнительно ограниченном количестве опытов получить надежные и достоверные результаты.

Данные рекомендации использованы при конструировании и изготовлении фрез фрезерно-брюсующих станков серии БРМ. В настоящее время такими фрезами оснащаются серийно изготавляемые модели БРМ-1.

#### Литература

- Методика планирования экспериментов и обработки их результатов при исследовании технологических процессов в лесной и деревообрабатывающей промышленности: В 3 ч. / Под ред. А.А. Пижурина. М., 1972. 2. Бурносов Н.В. К вопросу об однопроходной переработке тонкомера на брус и технологическую щепу // Механическая обработка древесины. Мн., 1974. Вып. 4. С. 107-110.