ISSN 2079-8490

Электронное научное издание
«Ученые заметки ТОГУ»
2017, Том 8, № 2, С. 47 – 53

Свидетельство
Эл № ФС 77-39676 от 05.05.2010
http://pnu.edu.ru/ru/ejournal/about/
ejournal@pnu.edu.ru

УДК 674-419.32

© 2017 г. **О. И. Бегунков,** канд. техн. наук,
Н. О. Бегункова, канд. техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СКЛЕИВАНИЯ ШПОНА В ПРОИЗВОДСТВЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ФАНЕРЫ

В статье приведена методика оптимизации режима склеивания шпона при изготовлении фанеры конструкционного назначения. Показаны результаты реализации данной методики оптимизации при разработке технологии такой фанеры из лиственницы.
Ключевые слова: оптимизация, фанера, прочность, деревянное домостроение.

O. I. Begunkov, N. O. Begunkova

OPTIMIZATION OF THE REGIMEOF VENEER PASTING FOR PRODUCTIONOF CONSTRUCTIVE PLYWOOD

The article provides the methodology for optimization of the regime of veneer pasting in the manufacture of plywood constructive purpose. The results of implementing this optimization methodology are demonstrated for development of this technology for the larch plywood.
Keywords: optimization, plywood, strength, wooden housing construction

Развитие малоэтажного деревянного домостроения предполагает широкое применение различных плитных материалов, в том числе и фанеры. При этом конструкционная фанера должна обладать высокими механическими показателями. Построение математической модели процесса разработки технологического режима такой фанеры требует не только правильного выбора и обоснования выходных параметров, но и его оптимизации. При оптимизации необходимо указать область факторного пространства, где лежат оптимальные условия, обеспечивающие высокую прочность фанеры.

Оптимизация любого технологического процесса заключается в максимизации (минимизации) одной или нескольких целевых функций при заданных ограничениях.

При наличии математической модели процесса нахождение оптимума целевой функции может осуществляться аналитическими методами (методы безусловной минимизации, метод множителей Лагранжа и вариационное исчисление), математическим программированием (линейное, нелинейное, динамическое, стохастическое), а также с помощью принципа максимума Понтрягина. Анализ имеющейся информации в области склеивания показывает, что такие процессы, как правило, носят нелинейный характер. Принимаем, что вид регрессионной функции представляет собой полином второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i<j}} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 , \tag{1}$$

где Y – значение параметра выхода; b – коэффициент регрессии; x – независимые условные переменные.

Если априори известно, что максимум целевой функции находится внутри области определения параметров, то оптимальную точку можно найти из решения системы трансцендентных уравнений вида

$$f'(x) = 0 . \tag{2}$$

Это будет задача на безусловный экстремум.

Как видно из (1), целевая функция (поверхность отклика) представляет собой некоторую квадратичную форму. Исследование формы поверхности отклика можно провести с помощью следующих двух методов:

1) путем приведения уравнения поверхности отклика к каноническому виду [1];

2) с помощью метода гребневого анализа, предложенного Хёрлем[2].

Приведение целевой функции к канонической форме состоит в переходе к новой системе координат, в которой уравнение приобретает вид, характеризующий форму поверхности отклика. Такое уравнение имеет только квадратичные члены:

$$Y_p = \sum_{i=1}^{k} B_{ii} X_i^2, \tag{3}$$

где $Y_p = \hat{Y} - Y_c$; Y_c – значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика; $\hat{Y}$ – значение функции, предсказанное уравнением регрессии; B_{ii} – канонические коэффициенты; X_i – новые координаты; k – количество факторов.

Из выражения (3) легко определить вид поверхности. Различные сочетания знаков канонических коэффициентов (собственных чисел) и соотношения между ними соответствуют поверхностям различного типа.

Методика выбора оптимальных режимов зависит от вида поверхности отклика. Если поверхность представляет собой некоторый эллипсоид, выбор режимов не вызывает затруднений. В случае задачи на максимум оптимальные условия будут соответствовать координатам центра поверхности, если знаки собственных чисел отрицательны и центр расположен внутри изучаемой области. Если собственные числа имеют знак плюс, то оптимальные условия будут на границе изученной области факторного пространства.

Если же поверхность отклика – гиперболический параболоид, то оптимальное значение технологических параметров будет находиться на границе области. Одним из методов исследования поверхности в этом случае является гребневой анализ (используется и другое название этого метода: «ридж-анализ»). В работе [3] показано явное преимущество применения метода «ридж-анализ» для случая, когда функцией ограничения (связи) является сфера радиуса R. «Ридж-анализ» базируется на методе неопределенных множителей Лангранжа.

Общий метод определения экстремальных точек для задач с ограничениями и без ограничений обычно заключается в следующем. Предполагается, что если найти способ пошагового определения точек X_1, X_2, X_3 и т.д., значения целевой функции в которых образуют убывающую сходящуюся последовательность, то можно надеяться, что тем самым удастся найти максимум функции, если последовательность принадлежит области изменения параметров. Методы построения таких последовательностей принято называть методами спуска.

Различные методы спуска отличаются друг от друга способами выбора направления спуска и длины шага вдоль этого направления. Кроме того, в зависимости от максимального порядка производных минимизируемой функции, вычисление которых предполагается, различают методы нулевого, первого порядка и т.д. К методам первого порядка следует отнести градиентные методы, методы сопряженных градиентов; к методам второго порядка - метод Ньютона, а также его модификации.

Градиентные методы обычно используются при наличии простейших ограничении типа:

$$m_i \le X_i \le M_i\,. \tag{4}$$

Эти методы являются локальными. А. А. Пижурин[4] отмечает, что из известных локальных методов минимизации достаточно гладких функций многих переменных при простейших ограничениях (4) наиболее эффективен метод сопряженных градиентов.

Кроме упомянутых, существуют также методы случайного поиска [5, 6]. Преимущества этих методов по сравнению с градиентными методами становятся ощутимыми при увеличении размерности задачи. Устойчивость метода обеспечивается за счет самокорректирующей способности алгоритма случайного поиска. При наличии же ограничений на свободу выбора допустимых оптимизируемых параметров алгоритм случайного поиска изменяется незначительно - нарушение хотя бы одного из ограничений воспринимается как неудачный шаг с последующим возвратом, пересчетом или экстраполяцией в зависимости от алгоритма [7].

Вообще выделить заранее какой-либо метод, пригодный в любом случае, невозможно. Для отыскания наиболее приемлемого метода обычно используют опыт, интуицию и предварительное исследование задачи [8]. Все зависит от природы функции $f(x)$.

В работе [9] для функции вида (1) при оптимизации процесса был успешно использован метод случайного поиска с пересчетом.

Цель настоящей работы - показать возможность применения метода случайного поиска с пересчетом для нахождения факторного пространства, позволяющего получить фанеру конструкционного назначения.

На основании сказанного, а также предварительного анализа постановки нашей задачи, для оптимизации режима склеивания шпона приняли метод случайного поиска с пересчетом. Программа метода реализует алгоритм случайного поиска для отыскания условного экстремума функции

$$Y^{(1)}=\sum_{i=0}^{n}\sum_{\substack{k=0\\(i\ge k)}}^{n} b_{ik}^{(1)}x_i x_k \tag{5}$$

при ограничениях вида

$$B_i \le Y^{(j)} \le A_i, (j=2,\ldots,m), \tag{6}$$

где B_i и A_i – константы.

Причем на независимые переменные наложены ограничения:

$$\alpha_i \le x_i \le \beta_i, \tag{7}$$

где α_i и β_i– константы.

Задача заключается в отыскании такой точки $X^{(0)}=\left(x_1^{(0)},x_2^{(0)},\ldots,x_k^{(0)}\right)$, для которой достигается минимум (максимум) квадратичной формы

$$Y^{(1)}\left(X^{(0)}\right)=\frac{\min}{\max}Y^{(1)}(X) \tag{8}$$

при ограничениях (6) и (7).

Существо метода заключается в следующем [7, 10]. В пространстве оптимизируемых факторов, заданного ограничениями типа

$$\alpha_i < x_i < \beta_i,\ i=1,2,\ldots,n, \tag{9}$$

где α_i = -1 и β_i = +1, находим точку $X^{(0)}$, удовлетворяющую всем ограничениям, накладываемым на выходные функции. Координаты точки определяются по формуле

$$x_i^{(0)}=\alpha_i+\left(\beta_i-\alpha_i\right)\xi_i^{(0)}, \tag{10}$$

где ξ_i – случайное число, равномерно распределенное в интервале (0, 1). Если точки удовлетворяют ограничениям (6), накладываемым на выходные функции, то вычисляется значение целевой функции в точке

$$X^{(0)}=\left(x_1^{(0)},x_2^{(0)},\ldots,x_k^{(0)}\right) \tag{11}$$

и осуществляется переход непосредственно к поиску экстремума целевой функции.

В пространстве переменных факторов X_i из начальной точки в случайном направлении делается шаг

$$X_i^{(N+1)}=X_i^{(N)}+\Delta X_i^{(N+1)}, \tag{12}$$

где N – номер шага; $\Delta X_i^{(N+1)}$ – шаг в пространстве.

Если значение целевой функции в новой точке удовлетворяет поставленному требованию (было меньше или больше в зависимости от задачи поиска), то повторяется шаг в том же случайном направлении. В противном случае система возвращается в первоначальное состояние, после чего делается поисковый шаг в новом случайном направлении. Смещение на(N+1)-м шаге определяется выражением:

$$\Delta x_i^{(N+1)}=\begin{cases} h_i\xi_i,\ \text{если}\ Y_N^{(1)}<Y_{N-1}^{(1)} \\ -\Delta x_i^{(N)}-h_i\xi_i,\ \text{если}\ Y_N^{(1)}\ge Y_{N-1}^{(1)} \end{cases} \tag{13}$$

при минимизации целевой функции, или

$$\Delta x_i^{(N+1)}=\begin{cases} h_i\xi_i,\ \text{если}\ Y_N^{(1)}>Y_{N-1}^{(1)} \\ -\Delta x_i^{(N)}+h_i\xi_i,\ \text{если}\ Y_N^{(1)}\le Y_{N-1}^{(1)} \end{cases} \tag{14}$$

при максимизации целевой функции. Здесь $Y_{N-1}^{(1)}$- наибольшее (наименьшее) значение целевой функции за N предыдущих шагов поиска; $h_i=\left(\beta_i-\alpha_i\right)/4$- длина шага; ξ_i – случайные числа, равномерно распределенные на отрезке (-1, +1) и нормированные, то есть

$$\sum_{i=1}^{n}\xi_i^2=1. \tag{15}$$

Переход в новую точку возможен лишь при выполнении всех ограничений (6) и (7).

Если число неудачных попыток перехода в новую точку превзойдет некоторое наперед заданное число t, то уменьшаем длину шага h_i вдвое. Число неудачных попыток можно выбрать равным$t = 5m \div 10m$. Поиск прекращается, когда $h_i < \xi$, где $\xi = (\beta_i - \alpha_i)2^u$ и $u = 8...10$.

После определения оптимальных значений целевой функции $Y^{(1)}$ находятся значения остальных функций в этих точках.

В качестве математической модели использовались уравнения регрессии второго порядка (см. формулу (1)), отражающие зависимость следующих выходных параметров от основных технологических факторов (расход клеяX_1, давление прессованияX_2, продолжительность склеиванияX_3, вязкость клеяX_4, температура прессованияX_5, количество наполнителяX_6) режима склеивания шпона[11]:

– предел прочности фанеры из лиственницы при растяжении вдоль волокон наружных слоев шпона (Y_1);

– предел прочности фанеры из лиственницы при растяжении поперек волокон наружных слоев шпона (Y_2);

– предел прочности фанеры из лиственницы при скалывании по клеевому слою вдоль волокон наружных слоев (Y_3);

– остаточные деформации фанеры из лиственницы (Y_4).

Для постановки и решения задачи оптимизации процесса, кроме наличия математической модели, выходных параметров и целевой функции, необходимо обосновать ограничения на другие функции. В качестве оптимизируемой (целевой) функции был принят предел прочности при растяжении вдоль волокон наружных слоев шпона. Этот показатель наиболее чувствителен к дефектам, имеющимся в самом шпоне, а также образовавшимся в процессе склеивания шпона.

При обосновании ограничений на другие функции будем исходить из существующих требований к лиственничной фанере. Нижние пределы прочности фанеры на скалывание и растяжение вдоль волокон регламентируются ГОСТ 3916.2-96 и составляют соответственно:1,0 МПа и 20,0 МПа.

Согласно ГОСТ 3916.2-96 фанера считается изготовленной из той породы древесины, из которой изготовлены ее наружные слои. Поэтому внутренние слои лиственничной фанеры могут быть изготовлены из лиственных пород. На наш взгляд, фанера конструкционного назначения должна быть полностью изготовлена из древесины лиственницы. Это позволит оптимальным образом реализовать высокие механические показатели самой древесины лиственницы, а также разработать соответствующие режимы склеивания из нее фанеры. Для фанеры из древесины лиственницы ЦНИИСК рекомендует [12] предел прочности при растяжении вдоль волокон 43,9 МПа. Тогда браковочный минимум определится по формуле:

$$\sigma_{Бр}^{Вр} = \sigma_{\min}^{Вр} + 3\sigma, \tag{16}$$

где $\sigma_{\min}^{Вр}$ – минимальное значение прочности фанеры, принимаемое соответственно для $Y_1 = 43{,}9$ МПа, для $Y_3 = 1{,}0$ МПа; σ– среднее квадратичное отклонение соответствующего параметра, определенное по данным эксперимента [11].

С учетом полученных по (16) значений ограничений задача оптимизации была сформулирована следующим образом:
отыскать значения

$$|X_i| \le 1,\ i = 1,...,6, \tag{17}$$

при которых

$$55{,}0 \le Y_1 = \max \qquad (18)$$

удовлетворяет ограничению

$$1{,}38 \le Y_3 = \max, \qquad (19)$$

и рассчитать при этом значения функций Y_2, Y_4.

Результаты расчетов по предложенному алгоритму приведены в табл. 1 и табл. 2.Основным критерием при выборе режимных точек служила оценка прочности фанеры по комплексному показателю ее качества, в который вошли выходные параметры Y_1, Y_2, Y_3, Y_4.

Таблица 1

Координаты условных экстремумов

Наименование факторов	Координаты условных экстремумов в кодированном (X_j) и натуральном ($\overline{X}_j$) виде в точках									
	1		2		3		4		5	
	X_j	$\overline{X}_j$	X_j	$\overline{X}_j$	X_j	$\overline{X}_j$	X_j	$\overline{X}_j$	X_j	$\overline{X}_j$
Расход, кг/м^2	-0,60	0,148	1,00	0,180	-1,00	0,140	-0,97	0,141	0,96	0,179
Давление, МПа	0,19	1,60	0,65	1,82	-0,29	1,36	0,32	1,66	0,01	1,50
Время, с	0,00	510	0,14	523	-0,18	494	-0,24	488	0,17	525
Вязкость, с по ВЗ-4	1,00	180	1,00	180	-0,91	65	-0,99	61	1,00	180
Температура, °С	-0,99	102,1	0,54	123,6	0,78	126,9	-0,97	102,4	-0,73	105,8
Наполнитель, мас. ч.	-0,10	1,80	1,00	4,00	-0,53	0,94	-0,77	0,46	0,97	3,94

Таблица 2

Расчетные значения выходных функций в точках условного экстремума

Наименование выходных функций	Значения выходных функций в точках				
	1	2	3	4	5
Предел прочности фанеры из лиственницы при растяжении вдоль волокон наружных слоев шпона (Y_1)	58,08	60,31	57,05	58,67	61,06
Предел прочности фанеры из лиственницы при растяжении поперек волокон наружных слоев шпона (Y_2)	34,05	39,07	31,79	32,97	36,73
Предел прочности фанеры из лиственницы при скалывании по клеевому слою вдоль волокон наружных слоев (Y_3)	1,54	1,49	1,38	1,38	1,51
Остаточные деформации фанеры из лиственницы (Y_4)	16,52	20,69	18,65	16,91	15,71

Из приведенных в таблицах данных заслуживает внимания режимная точка 5. Ее преимущества – высокие прочностные показатели в сочетании с минимальной остаточной деформацией. Высокий показатель прочности при растяжении вдоль волокон свидетельствует, что в данной точке режим позволяет получать фанеру с минимальным влиянием дефектов самого шпона и режима на прочность фанеры.

Среди остальных режимных точек определенный интерес представляет точка 1. В целом, не уступая по прочности точкам 3 и 4, она имеет самое низкое значение деформации. Что касается точки 2, то она, имея высокие прочностные показатели, уступает точке 1, а тем более точке 5 по величине остаточных деформаций. Большая остаточная деформация, как правило, приводит к повышенному расходу древесины на производство фанеры.

Таким образом, применение алгоритма случайного поиска с пересчетом позволило решить задачу оптимизации – указать область пространства факторов, обеспечивающих получение конструкционной фанеры с высокими прочностными показателями.

Список литературы

[1] Рузинов Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов. М.: «Химия», 1972. 200 с.

[2] Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: «Мир», 1977. 552 с.

[3] Слободчикова Р. И. Применение различных методов к исследованию поверхности отклика //Заводская лаборатория.Т. XXXII. № 10. 1966. С. 1234 – 1238.

[4] Пижурин А. А. Оптимизация технологических процессов деревообработки. М.:Лесн. пром-ть, 1975.312 с.

[5] Растригин Л. А. Статистические методы поиска. М, 1968. 6.с.

[6] Растригин Л. А., Сытенко Л. В. Многоканальные статистические оптимизаторы. М., 1973.145 с.

[7] Растригин Л. А. Алгоритмы случайного поиска (опыт классификации)// Алгоритмы и программы случайного поиска. Рига: «Зинатне», 1969. С. 7 – 21.

[8] Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. М.: «Наука», 1978.352 с.

[9] Самхарадзе Л. Т. Разработка, исследование и оптимизация технологических параметров изготовления композиционных древесных пластиков из опилок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЛТИ, 1977.20 с.

[10] Пижурин А. А., Пижурин А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки. М.: МГУЛ, 2004. 375 с.

[11] Бегунков О. И. Исследование и разработка технологии склеивания фанеры конструкционного назначения марки ФСФ из древесины лиственницы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЛТИ, 1980. 20 с.

[12] Рекомендации по расчетным сопротивлениям и модулям упругости фанеры из древесины лиственницы. ЦНИИСК. М.: «Стройиздат», 1977. 16 с.

E-mail:
Бегунков О. И. – olegbeg@mail.ru
Бегункова Н. О. – natali-beg@mail.ru