

С. В. Медведев [и др.] // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : Труды X Международн. евразийск. Симпозиума. – Екатеринбург. – 2015. – С. 170–176.

2. Huang, J. M. An Evaluation of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining / J. M. Huang, J. T. Black // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1996. – Pp. 545–554.

3. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting / E. Ceretti, P. Fallbohmer, W. T. Wu, T. R. Atlan // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Pp. 169–180.

4. Раповец, В. В. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В. В. Раповец // Труды БГТУ : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – Сер. 1. – 2017. – № 2 (198). – С. 360–364.

5. LS-DYNA : keyword user's manual / Livermore Software Technology Corporation, 2007. – V. 971. – 2196 pp.

6. Totis, G. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method / G. Totis, P. Albertelli, M. Monno // J. Sound Vib. – 2014. – № 333(3). – Pp. 646–668.

7. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учебное пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – 2-е изд. – Москва : Высш. шк., 2005. – 544 с.

8. Kiss, A. K. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations / A. K. Kiss, D. Bachrathy, S. Gabor // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2020. – № 142 (1). – Pp. 144–155.

9. Раповец, В. В. Методика расчета мощности в программной среде LS-DYNA через мгновенные значения сил и скоростей резания при фрезеровании древесины / В. В. Раповец // Труды БГТУ : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – Сер. 1. – 2018. – № 2 (210). – С. 290–295.

УДК 674.028.9+674.049.2

О. А. Рублева¹, А. Г. Гороховский², Е. Е. Шишкина
(О. А. Rubleva¹, A. G. Gorokhovskiy², E. E. Shishkina²)
(¹ВятГУ, г. Киров, РФ; ²УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)
E-mail для связи с авторами: olga_ru@vyatsu.ru

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ШИПОВ**

**METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RATIONAL VALUES
OF THE MODE PARAMETERS
OF THE LONGITUDINAL TENON-PRESSING PROCESS**

Для определения рациональных значений режимных параметров процесса торцового прессования шипов использована методика, основанная на параметрической оптимизации по методу обобщенного приведенного градиента. Обобщенная целевая функция построена на основе регрессионных моделей, описывающих выходные параметры объекта оптимизации: усилие прессования, твердость дна проушин, глубину деформированной зоны. В результате решения оптимизационной задачи для образцов из древесины сосны получены значения управляющих факторов $W = 10,6 \%$, $h_n = 11$ мм,

$B = 4$ мм и ожидаемые значения выходных параметров $F_{es} = 5\,473$ Н, $HRL = 176$ %, $h_3 = 35$ %. Целевая функция имеет потенциал в направлении уменьшения ширины проушин.

To determine the rational values of the mode parameters of the longitudinal tenon-pressing process, a technique based on parametric optimization by the method of generalized reduced gradient is used. The generalized objective function is built on the basis of regression models describing the output parameters of the optimization object: pressing force, hardness of the mortise bottom, depth of the deformed zone. As a result of solving the optimization problem for pine wood samples, the following control factors are obtained $W = 10,6$ %, $h_n = 11$ mm, $B = 4$ mm and expected values of the output parameters $F_{es} = 5\,473$ N, $HRL = 176$ %, $h_3 = 35$ %. The objective function has the potential to reduce the mortise width.

Формирование элементов шиповых соединений (многократных прямоугольных шипов и проушин) способом торцового прессования является экономичной альтернативой традиционной технологии фрезерования [1]. Промышленное внедрение способа требует обоснованного назначения режимных параметров, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных затратах ресурсов.

Поиск оптимальных значений режимных параметров – комплексная многомерная задача, требующая поиска компромиссных решений с учетом множества критериев. Нахождение оптимальных значений параметров процессов относится к параметрической оптимизации, входящей в задачи, решаемые в рамках математического программирования. Основные этапы моделирования включают определение области исследования (выбор диапазона варьирования факторов и разработку совокупности базовых математических моделей, описывающих объект оптимизации), создание целевой функции с критерием поиска (max или min), определение ограничений для управляемых переменных.

Для параметрической оптимизации в деревообработке эффективен подход, основанный на исследовании совокупности математических моделей, описывающих процессы и показатели качества обработки [2, 3]. Особенность и сложность решения таких оптимизационных задач состоит в том, что они являются многоцелевыми: экстремумы каждой отдельной функции могут находиться в различных точках исследуемого диапазона, и найденные решения по наборам входных параметров для каждой из функций могут быть не согласованы. Один из вариантов компромиссного решения заключается в оптимизации процесса для каждого выходного параметра в отдельности, после чего определяют рациональные значения входных параметров методом условного центра масс [2, 4].

Другим вариантом решения многокритериальных задач исследования операций является переход к единственному критерию оптимальности на основе применения способов свертки критериев [5]. К таким способам относится разработка обобщенной целевой функции на основе моделей, описывающих отдельные параметры объекта оптимизации. Использование такой сложносоставной целевой функции в виде нелинейного выражения приводит к задаче нелинейного программирования. Поиск ее решений может быть проведен с помощью градиентных методов [5].

Целью исследования является разработка методики определения рациональных значений режимных параметров процесса торцового прессования шипов. Задачи: разработка целевых функций и решение задач параметрической оптимизации процесса торцового прессования шипов на примере заготовок из древесины сосны.

Ранее установлены наиболее существенные режимные параметры (управляющие факторы), влияющие на процесс местного торцового прессования: влажность

древесины W , ширина B и глубина h_n формируемых проушин [6]. Основными характеристиками процесса (критериями оптимизации) являются энергосиловой показатель – усилие прессования проушин F_{es} и показатели качества обработки: твердость дна проушин HRL [7] и глубина деформированной зоны h_3 [8]. Схема математического описания объекта оптимизации – процесса прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины – представлена на рисунке 1.

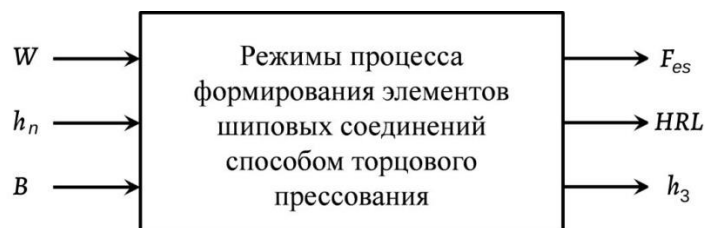


Рис. 1. Схема математического описания объекта оптимизации

Для разработки целевых функций необходимо получить математические модели, описывающие процесс. С этой целью проведена серия планируемых экспериментов по плану Бокса–Бенкена для трех факторов в диапазоне $W = 8\text{--}18\%$, $B = 4\text{--}20\text{ мм}$, $h_n = 5\text{--}11\text{ мм}$. В результате получены регрессионные модели в натуральном виде (1)–(3), описывающие влияние режимных параметров на характеристики процесса прессования:

$$F_{es} = 9\,625,88 - 928,03W - 1\,430,17h_n + 2\,068,89B + 28,97W^2 + 61,40h_n^2 + 45,76Wh_n - 68,03WB \quad (1)$$

$$HRL = 25,89 + 21,40W + 5,84B - 1,06W^2 - 0,35B^2 + 0,10Wh_n + 0,29WB \quad (2)$$

$$h_3 = 66,85 + 4,68h_n + 1,98B + 0,09W^2 - 1,00h_n^2 - 0,14B^2 - 0,25WB + 0,76h_nB \quad (3)$$

На первом этапе поиска рациональных значений параметров процесса произвели поиск экстремальных значений для каждой из функций (1)–(3). Усилие прессования F_{es} влияет на энергосиловые затраты процесса; его величина должна быть минимальной. Твердость дна проушин HRL влияет на впитываемость клея [7] и вследствие этого на его расход и прочность клеевого соединения. Значение твердости должно быть максимальным. Глубина деформированной зоны h_3 влияет на эстетическую оценку зоны клеевого шва, в связи с чем желательна ее минимизация. Отметим, что для поиска решений использовали уравнения в натуральном виде, поскольку это позволяет непосредственно оценивать полученные значения управляющих и выходных факторов без дополнительной операции их перевода из кодированной формы в натуральные.

В оптимизационные модели (4)–(6) включили целевую функцию и ограничения на входные параметры\переменные факторы\варьируемые параметры:

$$\left(\begin{array}{l} F_{es} \rightarrow \min \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\begin{cases} HRL \rightarrow \max \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} h_3 \rightarrow \min \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases} \quad (6)$$

Поиск решений задач оптимизации выполнили по методу обобщенного приведенного градиента (далее – ОПГ), применимого для решения гладких нелинейных задач. Процедуру оптимизации реализовали в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решений» [9]. Для каждой из целевых функций было определено оптимальное значение (отмеченные зеленым цветом ячейки на рис. 2) с учетом ограничений (рис. 3) для переменных (отмеченные желтым цветом ячейки на рис. 2). На рисунке 3 приведен пример задания ограничений для целевой функции (4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K									
1																				
2	$F_{es} = 9625,88 - 928,03 W - 1430,17 h_n + 2068,89 B + 28,97 W^2 + 61,40 h^2 +$ $+ 45,76 W h_n - 68,03 W B$										Fes	минимум								
3																				4129,505
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13	$h_3 = 66,85 + 4,68 h_n + 1,98 B + 0,09 W^2 - 1,00 h_n^2 - 0,14 B^2 -$ $- 0,25 W B + 0,76 h_n B$										h3s	минимум								
14																				33,41096
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24	$HRL = 25,89 + 21,40 W + 5,84 B - 1,06 W^2 - 0,35 B^2 + 0,10 W h_n + 0,29 W B$										HRL	максимум								
25																				207,0068
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				
32																				
33																				

Рис. 2. Результаты решения оптимизационных задач для трех выходных параметров процесса в программе Microsoft Excel

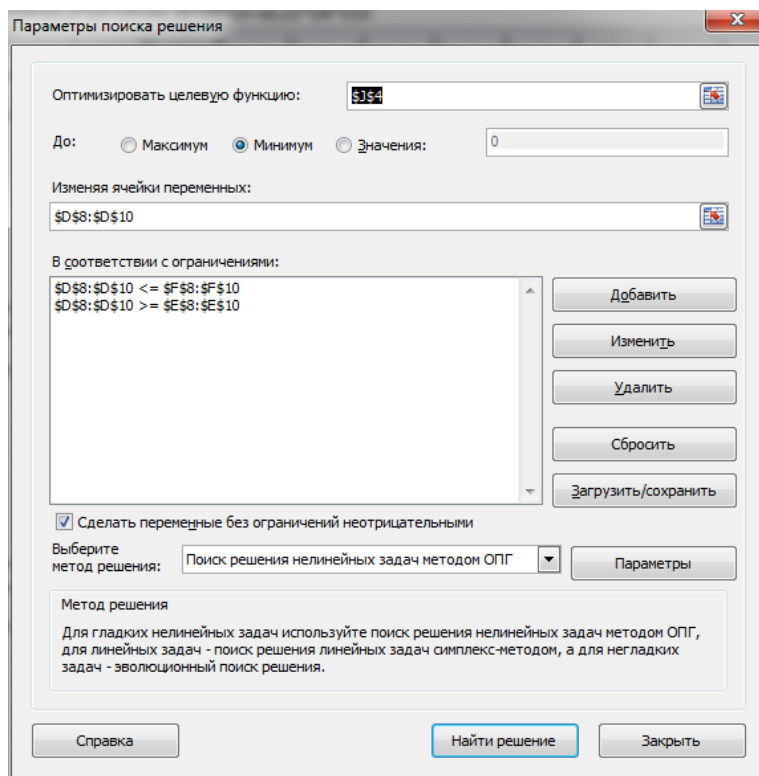


Рис. 3. Пример задания ограничений в диалоговом окне «Поиск решения»

Результаты оптимизации режимов прессования по частным критериям приведены в таблице.

Результаты оптимизации по частным критериям

Целевая функция	Значения управляющих факторов			Значение целевой функции
	W , %	h_n , мм	B , мм	
$F_{es} \rightarrow \min$	16,3	5,6	4	4 129,51 Н
$HRL \rightarrow \max$	12,5	11	13,8	207,01 %
$h_n \rightarrow \min$	8	11	4	33,41 %

В целом полученные решения согласуются с результатами анализа экспериментальных регрессионных зависимостей и их графических представлений [6–8]. Однако это не позволяет дать общие рекомендации по режимам прессования проушин, поскольку дифференцированный поиск оптимумов по трем целевым функциям дает несогласующиеся результаты: управляющие параметры присутствуют как на нижней, так и на верхней границе диапазона варьирования.

Тогда совокупность моделей (4)–(6) преобразовали в оптимизационную модель (7), задачей которой является одновременное снижение энергосиловых затрат при повышении качества формирования проушин:

$$\begin{cases} F_{es} \rightarrow \min \\ h_3 \rightarrow \min \\ HRL \rightarrow \max \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases} \quad (7)$$

Первые три условия модели (7) выразили в виде целевой функции:

$$\frac{F_{es}h_3}{HRL} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Весомость каждой составляющей адекватна используемой размерности. Оптимизационная модель (7) приобрела вид:

$$\begin{cases} \frac{F_{es}h_3}{HRL} \rightarrow \min \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases} \quad (9)$$

Поиск решения по методу ОПГ дал следующие результаты:

- значения управляющих факторов: $W = 10,6 \%$, $h_n = 11$ мм, $B = 4$ мм;
- ожидаемые значения выходных параметров: $F_{es} = 5473$ Н, $HRL = 176 \%$, $h_3 = 35 \%$ (рис. 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
40											
41											
42										целевая	
43										функция	
44										1088,932	минимум
45											
46											
47											
48											
49											
50											
51											
52											

		Ограничения			
		min	max		
W	10,54654927	8	18	Fes	5472,564
hn	11	5	11	h3	34,93141
B	4	4	20	HRL	175,5522

Рис. 4. Результаты решения оптимизационной задачи для обобщенной целевой функции

Найденное в результате решения значение управляющего фактора «ширина проушины» $B = 4$ мм расположено на нижней границе диапазона варьирования. При этом ранее установлено [10], что многократные шипы и проушины малых толщин (порядка 2 мм) могут эффективно использоваться для сращивания по длине. С учетом этого следует, используя прогнозные свойства моделей (1)–(3), расширить диапазон варьирования ширины проушины в направлении тренда оптимизации: $B = 2–20$ мм. Поиск решения по методу ОПГ вновь показал результат на границе диапазона: $B = 2$ мм (рис. 5), т. е. целевая функция имеет потенциал в данном направлении. Данный вывод согласуется с результатами исследований качества шиповых соединений, приведенными в работе О. А. Рублевой [10].

Для определения рациональных значений режимных параметров процесса торцового прессования шипов использована методика, основанная на параметрической оптимизации по методу обобщенного приведенного градиента. Обобщенная целевая функция построена на основе регрессионных моделей, описывающих выходные параметры объекта оптимизации: усилие прессования, твердость дна проушин, глубину деформированной зоны.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
60											
61											
62								Fes*h3/HRL	целевая функция		
63									338,6069	минимум	
64											
65											
66					Ограничения			Fes	2778,559		
67					min	max		h3	19,07917		
68		W	8,64872239		6	18		HRL	156,561		
69		hn	11		5	11					
70		B	2		2	20					
71											
72											

Рис. 5. Результаты решения оптимизационной задачи для обобщенной целевой функции при расширении диапазона варьирования управляющих параметров

В результате решения оптимизационной задачи для образцов из древесины сосны получены значения управляющих факторов $W = 10,6\%$, $h_n = 11$ мм, $B = 4$ мм и ожидаемые значения выходных параметров $F_{es} = 5\,473$ Н, $HRL = 176\%$, $h_3 = 35\%$. Целевая функция имеет потенциал в направлении уменьшения ширины проушин.

Библиографический список

1. Патент № 2741614 Российская Федерация, МПК В27F 1/00 (2006.01). Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок : № 2011116271/13 : заявл. 25.04.2011 : опубл. 10.01.2013 / Рублева О. А.
2. Гороховский, А. Г. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов / А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. А. Гороховский // Вестник МарГТУ. – 2011. – № 1. – С. 52–58.
3. Яцун, И. В. Исследование физико-механических и рентгенозащитных свойств древокомпозиционного слоистого материала «Фанотрен Б» / И. В. Яцун, А. Г. Гороховский, С. А. Одинцева // Лесной журнал. – 2019. – № 3. – С. 110–120.
4. Андреев, В. Н. Принятие оптимальных решений : теория и применение в лесном комплексе / В. Н. Андреев, Ю. Ю. Герасимов. – Йошсуу : Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. – 200 с.
5. Пижурин, А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – Москва : МГУЛ, 2004. – 375 с.
6. Rubleva, O. A. Prediction model for the pressing process in an innovative forming joints technology for woodworking / O. A. Rubleva, A. G. Gorokhovskiy // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – Т. 537. – 2019. – № 2. – Ст. 022064.
7. Рублева, О. А. Исследование влияния режимов торцового прессования на твердость дна проушин / О. А. Рублева // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : мат-лы Междунар. науч.-технич. конф. (Вологда, 6 дек. 2011 г.). – Вологда : ВоГТУ, 2012. – С. 105–107.
8. Rubleva, O. A. Structural changes of Scots pine wood caused by local pressing in the longitudinal direction / O. A. Rubleva // Drevno. – Т. 62. – 2019. – № 204. – С. 23–39.
9. Постановка и решение задачи с помощью надстройки «Поиск решения» // Microsoft. – URL : <https://support.office.com/ru-ru/article/постановка-и-решение-задачи-с-помощью-надстройки-поиск-решения-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>.
10. Рублева, О. А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования / О. А. Рублева // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 4 (вып. 12). – С. 126–133.