

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

кандидат технических наук, доцент **О.А. Рублева**

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация

Клеевые шиповые соединения широко применяются в изделиях из древесины. Способ торцового прессования элементов шиповых соединений является экономичной альтернативой традиционному фрезерованию. Промышленное внедрение нового способа требует обоснованного выбора режимных параметров процесса, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных ресурсных затратах. Эта многокритериальная задача относится к области исследования операций и решается методами математического моделирования. В работе поставлена цель определить рациональные значения параметров процесса торцового прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины типичных пород: хвойной (сосны), лиственной рассеяннососудистой (березы), лиственной кольцесосудистой (дуба). Разработку целевой функции для процедуры оптимизации осуществили на основе принципа справедливого компромисса с приведением частных критериев к безразмерному виду. Для построения целевой функции использовали регрессионные модели, описывающие выходные параметры процесса: усилие прессования, твердость дна проушин, глубину деформированной зоны. Поиск решений задач оптимизации выполнили по методу обобщенного приведенного градиента в программном пакете Microsoft Excel. Определены рациональные значения входных параметров (влажности, глубины и ширины проушин) и ожидаемые значения выходных параметров для каждой из исследованных пород. Рекомендуемые значения влажности для заготовок из древесины сосны 8 %, березы – 9,5 %, дуба – 7 %; глубины прессуемых проушин – 11, 8 и 9 мм соответственно, ширины проушин – 4 мм. Целевая функция имеет потенциал в направлении уменьшения ширины проушин, что может быть использовано для совершенствования прочностных показателей клеевых соединений на многократные прессованные шипы.

Ключевые слова: шиповые соединения, прессование древесины, технологические параметры, исследование операций, оптимизация, многокритериальная задача, метод обобщенного приведенного градиента

RATIONAL VALUES OF THE PARAMETERS OF THE END PRESSING PROCESS OF TENON JOINT ELEMENTS

PhD (Engineering), Associate Professor **O.A. Rubleva**

FSBEI HE "Vyatka State University", Kirov, Russian Federation

Abstract

Glue tenon joints are widely used in wood products. The face pressing method of the tenon joint elements is an economical alternative to traditional milling. The industrial implementation of the new method requires a reasonable choice of process operating parameters that ensure high quality processing with minimal resource costs. This multicriteria problem belongs to the field of operations research and is solved by mathematical modeling methods. The goal of the work is to determine the rational values of the parameters of the end face pressing process of rectangular eyes in blanks from wood of typical species: coniferous (pine), broad-leaved diffuse-porous (birch), leaf ring-porous (oak). The development of the objective function for the optimization procedure was carried out on the basis of the principle of fair compromise with the reduction of particular criteria to dimensionless form. To construct the objective function, we used regression models that describe the output parameters of the process: the pressing force, the hardness of eye bottoms, and the depth of the deformed zone. The search for solutions to optimization problems was performed using the genera-

lized reduced gradient method in the Microsoft Excel software package. The rational values of the input parameters (moisture content, depth and width of the eyes) and the expected values of the output parameters for each of the studied species have been determined. Recommended moisture values for blanks from pine wood are 8 %, birch – 9.5 %, oak – 7 %; the depth of the pressed eyes is 11, 8 and 9 mm, respectively, the width of the eyes is 4 mm. The objective function has the potential in the direction of reducing the width of the eyes, which can be used to improve the strength characteristics of adhesive joints on multiple extruded spikes.

Keywords: tenon joints, wood pressing, technological parameters, operations research, optimization, multicriteria problem, generalized reduced gradient method

Введение

В производстве изделий из древесины широко применяются клеевые соединения на шипы различных форм [1, 19–21, 25]. Наиболее распространенным способом формирования шипов является фрезерование. К недостаткам этого способа относятся высокая стоимость фрезерного инструмента и затраты на его периодическую заточку, необходимость удаления стружки [12, 19].

Предложенная в работах [11, 12] технология формирования элементов шиповых соединений на основе способа холодного торцового прессования позволяет устранить указанные недостатки. Формирование профиля шипового соединения в виде ряда прямоугольных проушин осуществляется путем внедрения пуансона соответствующего профиля в торец заготовки вдоль волокон древесины [12, 23]. Полученные отпечатки имеют высокую точность и качество поверхности [22]. Прочность клеевых соединений на прессованные шипы удовлетворяет нормативным требованиям [12, 13]. Промышленное внедрение рассматриваемого способа сдерживается отсутствием комплексных рекомендаций по назначению режимных параметров.

Параметры процессов местного торцового прессования изучены недостаточно и практически не отражены в научно-технической литературе. Исследования процессов местного прессования древесины, применяемого для формирования пазов, проушин, гнезд или отверстий, проведены в основном для случаев прессования поперек волокон, в том числе в сочетании с вырубкой [17, 18]. Местное прессование при внедрении пуансона вдоль волокон ранее применялось для случаев формирования зубчатых шипов с ограниченными геометрическими параметрами [24].

Математические модели, описывающие аспекты протекания процесса прессования прямоугольных проушин и их достигаемые характеристики, приведены в работах [12, 22, 23]. Частный анализ таких обособленных моделей затрудняет выбор рациональных режимов обработки из-за наличия конкурирующих требований к процессу, таких как высокое качество обработки при минимальных ресурсных затратах. Эта комплексная задача по нахождению рациональных значений режимных параметров требует поиска компромиссных решений с учетом множества критериев. Такая задача относится к области исследования операций, позволяющей получить приемлемые решения на основе математического моделирования процессов [2, 8–10]. Нахождение оптимальных и квазиоптимальных значений параметров технологических процессов относится к параметрической оптимизации, входящей в задачи математического программирования [8, 10].

Для одноцелевой оптимизации (поиска экстремумов линейных и нелинейных функций с одной или несколькими переменными) разработан ряд достаточно эффективных численных методов: дихотомии, золотого сечения, градиентный; покоординатного поиска, крутого восхождения, штрафных функций, допустимых направлений, симплекс-метод и др. [9]. Для параметрической оптимизации исследуемого процесса необходимо исследовать совокупность моделей (функций). Особенность решения таких многокритериальных задач состоит в том, что они являются многоцелевыми. При конкурирующих целях критерии оптимальности могут противоречить друг другу, и экстремумы каждой из исследуемых функций могут находиться в разных точках исследуемого диапазона [16]. В связи с этим

выбор целевой функции является важнейшей и достаточно сложной задачей [2, 8].

Процедура решения многокритериальной задачи включает использование механизма выбора наилучшей альтернативы из множества [4]. Для процедур априорного типа [4, 10] сведение многокритериальной задачи к однокритериальной может быть осуществлено с помощью различных методов: главной компоненты [10], взвешенной суммы частных критериев (линейной свертки с использованием весовых коэффициентов) [4, 5, 8, 9], справедливого компромисса [4, 5], последовательных уступок [8, 15], идеальной точки [4] и др. Выбор принципа оптимальности обуславливается структурой конкретной задачи. Для решения поставленной в работе задачи ряд существенных преимуществ имеет принцип справедливого компромисса. В частности, это невозможность компенсации недопустимо малых значений некоторых критериев достаточно большими значениями других [4]. 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, 9], что успешно реализовано в работах, связанных с исследованием процессов деревопереработки [3, 16].

Целью исследования является определение рациональных значений параметров процесса торцового прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины типичных пород: хвойной (сосны), лиственной рассеянно-сосудистой (березы), лиственной кольцесосудистой (дуба).

Материалы и методы

Постановка задачи оптимизации осуществлена по методикам, принятым в математическом моделировании [8, 10, 15]:

- 1) содержательная постановка задачи, выбор цели оптимизации;
- 2) формализация задачи:
 - а) определение области исследования (выбор управляемых переменных и разработка совокупности адекватных математических моделей, описывающих процесс прессования);
 - б) создание целевой функции и определение ограничений для управляемых переменных;

3) исследование математической модели оптимизации.

Для получения математических моделей, описывающих процесс прессования и показатели качества сформированных проушин, использовали методики планирования экспериментов [14]. Характеристики исследуемых материалов и оборудования, методики исследований описаны в [12, 22, 23]. Постановку экспериментов для образцов из древесины березы и дуба осуществляли по полнофакторному плану типа 2^3 ; для образцов из древесины сосны – по плану Бокса-Бенкена (некомпозиционному плану второго порядка для трех факторов) [14, 22, 23]. Статистический анализ полученных данных проводили с доверительной вероятностью 95 % при помощи программных пакетов Microsoft Excel и Statistica.

Для разработки целевой функции применили принцип справедливого компромисса [4, 5] с приведением частных критериев к безразмерной форме [9, 10]. Поиск решений задач оптимизации выполняли по методу обобщенного приведенного градиента (далее – ОПГ). Процедуру оптимизации реализовали в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решений» [6].

Результаты и обсуждение

Наиболее существенными режимными параметрами (управляющими факторами), влияющими на процесс местного торцового прессования, являются влажность древесины W , ширина B и глубина h_n формируемых проушин [22, 23]. К основным выходным характеристикам процесса относятся энергосиловой показатель – усилие прессования проушин F_c – и показатели качества обработки: характеристика увеличения твердости дна проушин HRL (HRM) и глубина деформированной зоны h_3 [22].

Компромиссное решение по нахождению рациональных значений режимных параметров процесса прессования проушин должно быть найдено с учетом указанных входных и выходных параметров. Схема математического описания объекта оптимизации представлена на рис. 1.

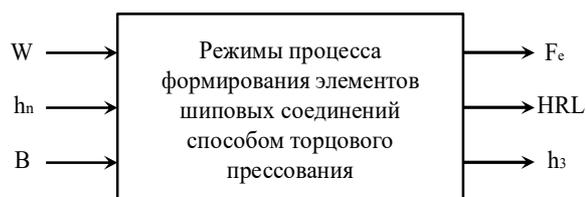


Рис. 1. Схема математического описания объекта оптимизации (собственные разработки)

$$\begin{cases} F_e \rightarrow \min \\ h_3 \rightarrow \min \\ HRL \rightarrow \max \end{cases} \quad (1)$$

Математические модели, описывающие критерии (1), получены для исследованного диапазона (табл. 1) в виде регрессионных уравнений (табл. 2) [12, 22, 23].

Организация условий для экономного расходования ресурсов при выполнении технологических операций относится к стратегически важным направлениям развития деревообрабатывающего производства. В этой связи цель проводимой оптимизации состоит в обеспечении минимальных энергосиловых затрат процесса прессования при максимальных значениях показателей качества обработки:

Для получения достоверных результатов при проведении процедуры оптимизации математические модели должны адекватно отражать исследуемый процесс [7, 10]. Статистический анализ, проведённый с доверительной вероятностью 95 % по методике [14], включал расчет дисперсий коэффициентов регрессии, определение доверительных интервалов, проверку значимости коэффициентов регрессии. В приведенные в табл. 2 уравнения включены только значимые коэффициенты регрессии.

Таблица 1

Диапазоны варьирования управляемых переменных

Варьируемые факторы	Значения факторов					
	сосна		береза		дуб	
	min	max	min	max	min	max
Влажность древесины W, %	8	18	6,5	9,5	7	9
Глубина проушины h_n , мм	5	11	4	8	6	9
Ширина проушины B, мм	4	20	4	20	4	20

Источник: собственные разработки

Таблица 2

Регрессионные модели

Порода	Модель	R ²
Сосна	$F_{es} = 9625,88 - 928,03W - 1430,17h_n + 2068,89B + 28,97W^2 + 61,40h_n^2 + 45,76Wh_n - 68,03WB$	0,9949
	$HRL_s = 25,89 + 21,40W + 5,84B - 1,06W^2 - 0,35B^2 + 0,10Wh_n + 0,29WB$	0,7983
	$h_{3s} = 66,85 + 4,68h_n + 1,98B + 0,09W^2 - 1,00h_n^2 - 0,14B^2 - 0,25WB + 0,76h_nB$	0,7409
Береза	$F_{eb} = 5129,73 - 788,401W + 1814,73B + 70,12Wh_n - 56,53h_nB$	0,9919
	$HRM_b = 201,84 - 5,39W + 5,74h_n - 0,01h_nB$	0,6321
	$h_{3b} = 860,4975 - 73,4437W - 67,4747h_n - 20,7056B + 5,8062Wh_n + 1,7203WB + 0,8702h_nB$	0,9582
Дуб	$F_{ed} = 4716,61 + 346,60W + 1382,70h_n - 1007,01B - 239,01Wh_n + 357,66WB + 2,90Wh_nB$	0,9983
	$HRM_d = 246,75 - 7,28W - 1,43h_n - 4,93B + 0,52h_nB$	0,9487
	$h_{3d} = 156,65 - 29,36h_n + 22,23B + 2,33Wh_n - 2,26WB$	0,7075

Источник: собственные разработки

Адекватность моделей подтверждена путём проверки по F-критерию Фишера [14, 22], а их качество – высокими значениями коэффициентов детерминации (табл. 2).

Целевая функция, разработанная по принципу справедливого компромисса [4, 5] на основе группы критериев (1), и набор ограничений составили оптимизационную модель:

$$\begin{cases} \frac{F_{en} \cdot h_{3n}}{HRL_n} \rightarrow \min \\ W_{min} \leq W \leq W_{max} \\ B_{min} \leq B \leq B_{max} \\ h_{nmin} \leq h_n \leq h_{nmax} \end{cases}, \quad (2)$$

где F_{en} , h_{3n} , HRL_n (для березы и дуба – HRM_n), – нормированные значения критериев, определяемые по соотношению (3) [4, 9]

$$W_{in} = \frac{W_i - W_{i min}}{W_{i max} - W_{i min}}, \quad (3)$$

где W_{in} – нормированное значение i-го критерия;

W_i – натуральное значение i-го критерия;

$W_{i min}$ – минимальное значение i-го критерия в диапазоне исследования;

$W_{i max}$ – максимальное значение i-го критерия в диапазоне исследования.

Поиск максимальных и минимальных значений регрессионных моделей F_e , h_3 , HRL (HRM) (табл. 2) для определения нормированных значений (3) выполнили по методу ОПГ. На основе найденных экстремальных значений, приведенных в табл. 3, по формуле (3) вычислены нормирован-

ные значения критериев F_{en} , h_{3n} , HRL_n и решены задачи оптимизации (2) по методу ОПГ для трех исследуемых пород. Результаты приведены в табл. 4.

Для получения достоверных результатов при проведении процедуры оптимизации математические модели должны адекватно отражать исследуемый процесс [10]. Статистический анализ, проведенный с доверительной вероятностью 95 % по методике [14], включал расчёт дисперсий коэффициентов регрессии, определение доверительных интервалов, проверку значимости коэффициентов регрессии. В приведенные в табл. 2 уравнения включены только значимые коэффициенты регрессии. Адекватность моделей подтверждена путём проверки по F-критерию Фишера [14, 22]. Качество моделей подтверждено высокими значениями коэффициентов детерминации (табл. 2).

Обобщая результаты, можно отметить, что рекомендуемые значения влажности находятся в пределах 7-9,5 %, что указывает на целесообразность проведения обработки при влажности заготовок, близкой к эксплуатационной, для изделий, предназначенных для использования внутри помещений. Значение глубины прессуемых проушин может быть принято максимальным из исследуемого диапазона. Это положительно дает возможность изготавливать шипы с увеличенной длиной, что повышает прочность соединения [19, 20, 25].

Таблица 3

Экстремальные значения критериев F_e , h_3 , $HRL(HRM)$

Порода	Критерий	Единица измерения	Значение	
			min	max
Сосна	F_{es}	Н	4129,505	30763,27
	HRL_s	%	116,49	207,01
	h_{3s}	%	33,41096	112,7876
Береза	F_{eb}	Н	6658,92	33600,44
	HRM_b	%	172,79	212,41
	h_{3b}	%	74,65	240,00
Дуб	F_{ed}	Н	10707,82	50596,27
	HRM_d	%	136,45	181,92
	h_{3d}	%	64,84	107,14

Источник: собственные разработки

Результаты решения оптимизационной задачи

Порода	Оптимальные значения управляющих факторов			Ожидаемые значения управляемых параметров		
	W, %	h _n , мм	B, мм	F _e	h _з	HRL(HRM)
Сосна	8	11	4	5878,73	33,41	165,25
Береза	9,5	8	4	8419,00	74,65	196,24
Дуб	7	9	4	11246,72	64,84	181,92

Источник: собственные разработки

Оптимальное значение управляющего фактора «ширина проушины» $B = 4$ мм расположено на нижней границе диапазона варьирования, что указывает на перспективность шипов малых толщин. Используя прогнозные свойства моделей (табл. 2), расширим диапазон варьирования ширины проушины в направлении тренда оптимизации: $B = 2 - 20$ мм. Поиск решения по методу ОПГ вновь показывает результат на границе диапазона: $B = 2$ мм, т. е. целевая функция имеет потенциал в данном направлении. Этот результат значим для конструирования соединений: ранее установлено [12, 13], что многократные шипы малых (порядка 2 мм) толщин могут эффективно использоваться для сращивания по длине.

Определенные в результате решения задачи оптимизации значения параметров процесса могут быть использованы для реализации технологии торцового прессования элементов шиповых соединений в промышленных условиях. Значения управляющих факторов W , h_n , B необходимы для организации процесса, значения выходных параметров (управляемых параметров) F_e , $h_з$, HRL(HRM) – для планирования полученного результата.

Выводы

В работе решена задача параметрической оптимизации процесса торцового прессования проушин с целью обеспечения минимальных энергосиловых затрат при максимальных значениях показателей качества обработки. Поиск компромиссного решения по нахождению рациональных значений режимных параметров осуществлен по методу обобщенного приведенного градиента. В результате определены рациональные значения входных параметров (влажности W , глубины h_n и ширины B проушин) и ожидаемые значения выходных параметров (усилия прессования F_e , увеличения твердости дна проушин HRL(HRM) и глубины деформированной зоны $h_з$) для трех пород. Значения параметров составили: для образцов из древесины сосны $W = 8\%$, $h_n = 11$ мм, $B = 4$ мм; $F_{es} = 5878$ Н, $HRL_s = 165\%$, $h_{зs} = 33\%$; для образцов из древесины березы $W = 9,5\%$, $h_n = 8$ мм, $B = 4$ мм; $F_{eb} = 8419$ Н, $HRM_b = 196\%$, $h_{зб} = 75\%$; для образцов из древесины дуба $W = 7\%$, $h_n = 9$ мм, $B = 4$ мм; $F_{ed} = 11247$ Н, $HRM_d = 182\%$, $h_{зд} = 65\%$. Целевая функция имеет потенциал в направлении уменьшения ширины проушин, что может быть использовано для совершенствования прочностных показателей клеевых соединений на многократные прессованные шипы.

Библиографический список

1. Барташевич, А.А. Конструирование мебели / А. А. Барташевич, С. П. Трофимов. – Минск : Современная школа, 2006. – 336 с.
2. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1988. – 208 с.
3. Гороховский, А. Г. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов / А. Г. Гороховский, Е. Е. Шишкина, А. А. Гороховский // Вестник МарГТУ. – 2011. – № 1. – С. 52–58.

4. Дубов, Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 296 с.
5. Катулев, А. Н. Математические методы в системах поддержки принятия решений / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев. – Москва : Высшая школа, 2005. – 311 с.
6. Леоненков, А. В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.
7. Мазуркин, П. М. Статистическое моделирование процессов деревообработки / П. М. Мазуркин, Р. Г. Сафин, Д. Б. Просвирников. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 342 с.
8. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 488 с.
9. Пижурин, А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – Москва : МГУЛ, 2004. – 375 с.
10. Редькин, А. К. Математическое моделирование и оптимизация технологий лесозаготовок / А. К. Редькин, С. Б. Якимович. – Москва : МГУЛ, 2005. – 504 с.
11. Рублева, О. А. Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок // Пат. 2741614 Рос. Федерация. № 2011116271/13; заявл. 25.04.2011; опубл. 10.01.2013, приоритет 25.04.11.
12. Рублева, О. А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования / О. А. Рублева // Лесотехнический журнал. – 2013. – Т. 3. – № 4 (12). – С. 126–133. – DOI: 10.12737/2191.
13. Рублева, О. А. Экспериментальная оценка прочности склеивания древесины по длине на прямоугольные прессованные шипы / О. А. Рублева, А. Г. Гороховский // Лесной журнал. – 2020. – № 3. – С. 128–142. – DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-128-142.
14. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.
15. Струченков, В. И. Методы оптимизации в прикладных задачах / В. И. Струченков. – Москва : Солон-пресс, 2012. – 320 с.
16. 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. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110.
17. Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing / M. Gaff, M. Sarvašová-Kvietková, M. Gašparík, M. Slávik // Wood Research. – 2016. – Vol. 61. – № 1. – P. 163–174.
18. Hesselbach, J. Punching in industrial wood machining: an alternative production process to drilling / J. Hesselbach, H. W. Hoffmeister, T. Looß // Production Engineering. – 2007. – Vol. 1. – № 4. – P. 365–370. – DOI: 10.1007/s11740-007-0061-5.
19. Jokerst, R. W. Finger-Jointed Wood Product / R. W. Jokerst. – Forest Products Lab Madison Wi, №. FSRP-FPL-382, 1981. – 26 p.
20. Özçifçi, A. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations / A. Özçifçi, F. Yapıcı // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22. – № 7. – P. 1543–1550. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020.
21. Prekrat, S. Effect of glueline shape on strength of mortise and tenon joint / S. Prekrat, J. Smardzewski // Drvna industrija. – 2010. – Vol. 61. – № 4. – P. 223–228.
22. Rubleva, O. A. Structural changes of Scots pine wood caused by local pressing in the longitudinal direction / O. A. Rubleva // Drewno. – 2019. – Vol. 62. – № 204. – P. 23–39. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.268.06.
23. 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. – 2019. – Vol. 537. – № 2. – P. 022064. – DOI 10.1088/1757-899X/537/2/022064.
24. Strickler, M. D. Finger jointing of lumber / M. D. Strickler // Патент. 3262723 США, 1966.
25. Tankut, A. N. The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints / A. N. Tankut, N. Tankut // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. – 2005. – Vol. 29. – № 6. – P. 493–498.

References

1. Bartashevich A.A., Trofimov S.P. *Konstruirovaniye mebeli* [Furniture construction]. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2006. 336 p. (in Russian).
2. Ventcel' E.S. *Issledovanie operacij: zadachi, principy, metodologiya* [Operations research: tasks, principles, methodology]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 208 p. (in Russian).
3. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.A. (2011) *Optimizatsiya rezhimov sushki pilomaterialov* [Optimization of timber drying schedules]. *Vestnik MarGTU* [Bulletin of the MSTU], no. 1, pp. 52-58 (in Russian).
4. Dubov Yu.A., Travkin S.I., Yakimec V.N. *Mnogokriterial'nye modeli formirovaniya i vybora variantov system* [Multicriteria models of the formation and selection of system variants]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 296 p. (in Russian).
5. Katulev A.N., Severcev N.A. *Matematicheskie metody v sistemah podderzhki prinyatiya reshenij* [Mathematical methods in decision support systems]. Moscow, Vysshaja Shkola, 2005. 311 p. (in Russian).
6. Leonenkov A.V. *Reshenie zadach optimizatsii v srede MS Excel* [Solution of optimization problems in MS Excel]. St Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2005. 704 p. (in Russian).
7. Mazurkin P.M., Safin R.G., Prosvirnikov D.B. *Statisticheskoe modelirovaniye processov derevoobrabotki* [Statistical modeling of woodworking processes]. Kazan, KNITU Publ., 2014. 342 p. (in Russian).
8. Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 488 p. (in Russian).
9. Pizhurin A.A., Pizhurin A.A. *Modelirovaniye i optimizatsiya processov derevoobrabotki* [Modeling and optimization of woodworking processes]. Moscow, MGUL Publ., 2004. 375 p. (in Russian).
10. Red'kin A.K., Yakimovich S.B. *Matematicheskoe modelirovaniye i optimizatsiya tekhnologiy lesozagotovok* [Mathematical modeling and optimization of logging technologies]. Moscow, MGUL Publ., 2005, 504 p. (in Russian).
11. Rubleva O.A. *Sposob formirovaniya ehlementov shipovyh soedinenij derevyannyh zagotovok* [Method of finger joint's shaping in wood blanks]. Patent RF, no. 24716142013, 2013.
12. Rubleva O.A. (2013) *Formirovaniye pryamougol'nyh shipov sposobom torcovogo pressovaniya* [Formation of rectangular tenons by mechanical pressing method]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 3, no. 4 (12), pp. 126-133 (in Russian). DOI:10.12737/2191.
13. Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G. (2020) Experimental evaluation of strength of end joints with rectangular pressed fingers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], no. 3, pp. 128-142. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-128-142.
14. Spiridonov A.A. *Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (in Russian).
15. Struchenkov V.I. *Metody optimizatsii v prikladnykh zadachah* [Optimization methods in applied problems]. Moscow, Solon-press Publ., 2012. 320 p. (in Russian).
16. Yatsun I.V., Gorokhovskiy A.G., Odintseva S.A. (2019) Study of Physical and Mechanical and X-Ray Protection Properties of Wood -Based Composite Laminated Material "Fanotren B". *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], no. 3, pp. 110-120. DOI: 10.17238/ issn0536-1036.2019.3.110.
17. Gaff M., Sarvašová-Kvietková M., Gašparík M., Slávik M. (2016) Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing. *Wood Research*, vol. 61, no. 1, pp. 163-174.
18. Hesselbach J., Hoffmeister H.W., Looß T. (2007) Punching in industrial wood machining: an alternative production process to drilling. *Production Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 365-370. DOI: 10.1007/s11740-007-0061-5.
19. Jokerst R.W. *Finger-Jointed Wood Products*. Forest Products Lab Madison Wi, №. FSRP-FPL-382, 1981. 26 p.

20. Özçifçi A., Yapıcı F. (2008) Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations. *Construction and Building Materials*, vol. 22, iss. 7, pp. 1543-1550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020.
21. Prekrat S., Smardzewski J. (2010) Effect of glue-line shape on strength of mortise and tenon joint. *Drvna industrija*, vol. 61, iss. 4, pp. 223-228.
22. Rubleva O.A. (2019) Structural changes of Scots pine wood caused by local pressing in the longitudinal direction. *Drewno*, vol. 62, iss. 204, pp. 23-39. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.268.06.
23. Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G. Prediction model for the pressing process in an innovative forming joints technology for woodworking. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 537, iss. 2, article 022064. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022064.
24. Strickler M.D. *Finger jointing of lumber*. U.S. Patent, no. 3,262,723. 1966.
25. Tankut A.N., Tankut N. (2005) The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, vol. 29, iss. 6, pp. 493-498.

Сведения об авторе

Рублева Ольга Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и технологии деревообработки ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация; e-mail: olga_ru@vyatsu.ru.

Information about the author

Rubleva Olga Anatolyevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machines and Technologies for Woodworking, FSBEI HE "Vyatka State University", Kirov, Russian Federation; e-mail: olga_ru@vyatsu.ru.