

## Совершенствование конструкций рамных пил методами математического и твердотельного моделирования

Н.В. Кравченко<sup>a</sup>, А.А. Воробьев<sup>b</sup>, И.Н. Спицын<sup>c</sup>, Л.А. Очирова<sup>d</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,  
пр. «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

<sup>a</sup>kravchenkonv@sibsau.ru, <sup>b</sup>vorobjevaa@sibsau.ru, <sup>c</sup>compasg@mail.ru, <sup>d</sup>ochirovala@sibsau.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-8209-890X>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-7375-0230>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-3096-5586>, <sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0003-2515-2513>

Статья поступила 29.10.2018, принята 16.11.2018

*Рассматриваются особенности конструирования рамных пил для пиления мерзлой древесины на вертикальных лесопильных рамах. Форма зубьев пил, их угловые и геометрические параметры зависят от свойств распиливаемой древесины и выбираются исходя из конкретных условий распиловки с учетом особенностей процесса стружкообразования, характера формирования, размещения и степени уплотнения опилок, жесткости зуба пилы, их влияния на силовые и энергетические показатели процесса пиления. Создание оптимальной конструкции рамной пилы представляет собой сложную комплексную задачу. Поиск оптимальной формы и геометрических параметров зубьев рамных пил стал целью данного исследования. В статье представлена методика конструирования рамных пил с использованием методов математического и твердотельного моделирования. Авторами статьи получены аналитические уравнения, позволяющие рассчитывать в программе Mathcad площадь межзубовой впадины для задаваемых при конструировании инструмента геометрических параметров зубьев пил. Методом конечных элементов при твердотельном моделировании в среде SolidWorks определены максимальные и минимальные (начальные) напряжения в зубе рамной пилы при нагрузке, действующей по передней и задней граням зуба. Расчет силовых параметров процесса пиления перед 3D-моделированием зубьев пил выполнен с использованием авторской прикладной программы Frame\_Saw, которая позволяет определять усилия резания при различных условиях работы рамной пилы. Установлены локализация и величина максимальных напряжений в межзубовой впадине рамной пилы. Обоснована допускаемая продолжительность работы рамной пилы, определяемая усталостной прочностью металла при циклической нагрузке. В результате были установлены оптимальные значения линейных и угловых параметров зубьев конструкции рамной пилы со стандартизованным шагом для распиловки мерзлой древесины. Предлагаемая методика может быть рекомендована для внедрения в практику конструирования дереворежущего инструмента, эксплуатируемого при различных климатических условиях.*

**Ключевые слова:** пиление рамной пилой; конструкция рамной пилы; зуб пилы; угловые и линейные параметры пилы; пиление мерзлой древесины; межзубовая впадина.

## Improving the frame saw designs with the help of mathematical and solid-state modeling methods

N.V. Kravchenko<sup>a</sup>, A.A. Vorobjev<sup>b</sup>, I.N. Spitsyn<sup>c</sup>, L.A. Ochirova<sup>d</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>a</sup>kravchenkonv@sibsau.ru, <sup>b</sup>vorobjevaa@sibsau.ru, <sup>c</sup>compasg@mail.ru, <sup>d</sup>ochirovala@sibsau.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0001-8209-890X>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-7375-0230>,

<sup>c</sup><https://orcid.org/0000-0003-3096-5586>, <sup>d</sup><https://orcid.org/0000-0003-2515-2513>

The article arrived 29.10.2018, accepted 16.11.2018

*The design features of frame saws for sawing frozen wood on vertical sawing frames are considered. The shape of the teeth of the saws, their angular and geometrical parameters depend on the properties of the sawn wood and are selected based on the specific conditions of sawing taking into account: the features of the chip formation process; the nature of the formation, placement and degree of compaction of sawdust; saw tooth hardness; their influence on the power and energy performance of the sawing process. Creating an optimal frame saw design is a complex task. The search for the optimal shape and geometrical parameters of the teeth of frame saws has become the goal of this study. The article presents the method of designing frame saws using the methods of mathematical and solid modeling. The authors of the article obtained analytical equations that allow calculating the area of the interdental cavity in the Mathcad program for the saw teeth set when designing the tool. The finite element method for solid modeling in the environment of "Solid-Works" determined the maximum and minimum (initial) stresses in the frame saw tooth with a load acting on the front and rear edges of the tooth. The calculation of the power parameters of the sawing process before 3D modeling of the saw teeth was performed using the author's application program Frame\_Saw, which allows you to determine the cutting forces under various working conditions of the frame saw. The localization and magnitude of the maximum stress in the interdental cavity of the frame saw is established. The permissible operating time of the frame saw, determined by the fatigue strength of the metal under cyclic loading, is substantiated. As a result,*

*optimal values were established for linear and angular parameters of the teeth of the frame saw design with a standardized pitch for sawing frozen wood. The proposed technique can be recommended for the introduction into the practice of designing wood cutting tools that operate under different climatic conditions.*

**Keywords:** frame sawing; frame saw construction; saw tooth; angular and linear parameters of the saw; frozen wood sawing; interdental hollow.

### Введение

Рамные пилы используются на вертикальных лесопильных рамах. В процессе пиления древесины рамная пила осуществляет как собственно резание, так и транспортирование опилок из пропила. Размеры и форма полотна пилы, зубьев и межзубовых впадин в значительной мере влияют на эффективность работы режущего инструмента наряду с физико-механическими свойствами материала режущей части зубьев пилы.

Вопросами конструирования рамных пил в разные годы занимались И.П. Остроумов, А.С. Коргушов, М.Н. Орлов, Г.Ф. Прокофьев, С.М. Хасдан, А.Л. Воронцов, Е. Кивимаа, Б. Тунелл, В.Ф. Фонкин и др. [1–6]. К настоящему времени установлено наличие взаимосвязи угловых параметров резца с силовыми и качественными показателями процесса рамного пиления древесины, освещены вопросы использования инструментальных материалов и способов подготовки пил к работе.

Форма зубьев пил, их угловые и геометрические параметры зависят от свойств распиливаемой древесины и выбираются исходя из конкретных условий распиловки с учетом особенностей процесса стружкообразования, характера формирования, размещения и степени уплотнения опилок, жесткости (устойчивости) зуба пилы, их влияния на силовые и энергетические показатели процесса пиления. Известные рекомендации [7–14] содержат широкие диапазоны варьирования линейных и угловых параметров, характеризующих геометрию зубчатого венца рамных пил, что затрудняет их практическое использование.

Создание оптимальной конструкции рамной пилы представляет собой сложную комплексную задачу, для решения которой следует использовать современный математический аппарат и методы моделирования.

*Постановка задачи.* Поиск оптимальной формы и геометрических параметров зубьев рамных пил для распиловки мерзлой древесины стал целью данного исследования, поскольку вопросы конструирования дереворежущего инструмента, предназначенного для раскряя мерзлой древесины, недостаточно изучены и освещены.

В процессе исследования были сформулированы и последовательно решены следующие задачи:

- 1) разработана математическая модель профиля зуба рамной пилы;
- 2) проанализированы факторы, влияющие на прочность и устойчивость зубьев рамных пил;
- 3) создана программа для расчета силовых нагрузок на зубья рамных пил при различных условиях работы;
- 4) создана твердотельная имитационная модель рамной пилы;
- 5) определены критерии оптимизации профиля зубьев рамной пилы;
- 6) составлен алгоритм оптимизации профиля зубьев рамной пилы.

**Выбор оптимальной формы зубчатого венца рамной пилы.** Для решения задачи по выбору оптимальной формы зубчатого венца рамной пилы был использован метод математического моделирования.

Расчетная схема профиля зубьев рамной пилы представлена на рис. 1.

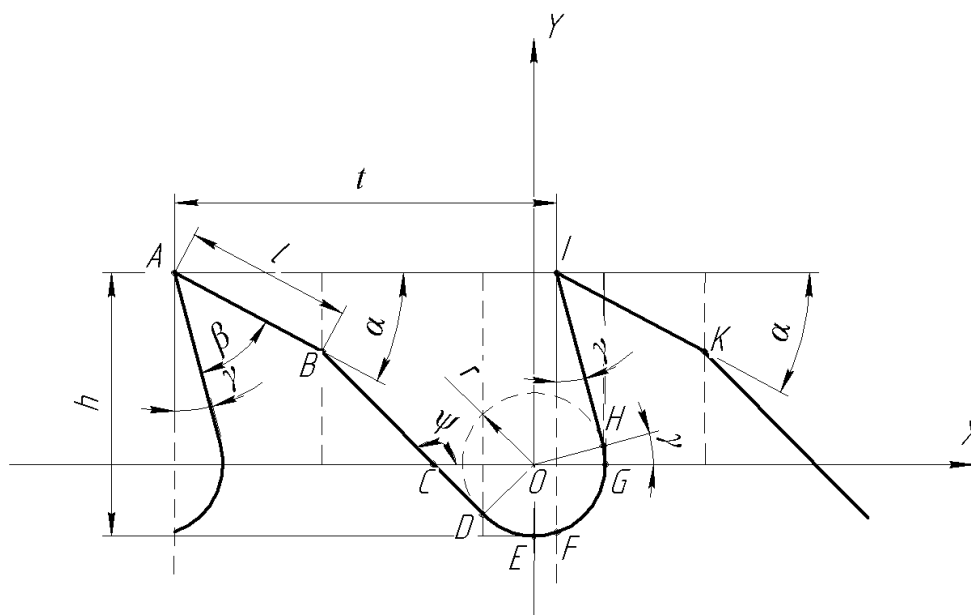


Рис. 1. Расчетная схема профиля зубьев рамной пилы

Уравнение нормали  $OH$  к касательной  $IH$  имеет вид:

$$y = \operatorname{tg}(\gamma) \cdot x. \quad (1)$$

Уравнение окружности с центром в точке  $O(0;0)$ :

$$x^2 + y^2 = r^2. \quad (2)$$

Координаты точки касания  $H(x_H, y_H)$  находим, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} y_H = \operatorname{tg}(\gamma) \cdot x_H \\ x_H^2 + y_H^2 = r^2 \end{cases} \quad (3)$$

Определяем координаты точки  $I$ . Для этого запишем уравнение касательной в общем виде:

$$(y - y_0) = k(x - x_0). \quad (4)$$

Параметр  $k$  определяется отношением:

$$k = -\frac{x_H}{y_H}. \quad (5)$$

Учитывая геометрические особенности профиля зубца, а также формулу (5), можем записать:

$$(h - r) - y_H = -\frac{x_H}{y_H} \cdot (x_I - x_H). \quad (6)$$

Решив уравнение (6), определяем значения координат  $x_I$  и  $y_I = h - r$ .

Составим уравнение касательной  $IH$ :

$$\frac{(x - x_I)}{(x_H - x_I)} = \frac{(y - y_I)}{(y_H - y_I)}. \quad (7)$$

Координаты точки  $A$ :  $x_A = x_I - t$ ;  $y_A = h - r$ .

Уравнение прямой  $AB$ :  $y_B = \operatorname{tg}(-\alpha) \cdot x_B$ .

Длину отрезка  $AB$  можно представить уравнением вида:

$$(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l^2. \quad (8)$$

Решая совместно систему уравнений (9), определяем координаты точки  $B(x_B, y_B)$ :

$$\begin{cases} y_B = \operatorname{tg}(-\alpha) \cdot x_B \\ (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 = l^2 \end{cases} \quad (9)$$

Составим уравнение прямой  $AB$ :

$$\frac{(x - x_A)}{(x_B - x_A)} = \frac{(y - y_A)}{(y_B - y_A)}. \quad (10)$$

Для нахождения касательной  $BD$  необходимо составить и решить систему четырех нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} (y - y_B) = -\frac{x_D}{y_D} \cdot (x + x_B) \\ x_D \cdot x + y_D \cdot y = r^2 \\ x^2 + y^2 = r^2 \\ y = -\frac{y_D}{x_D} \cdot x \end{cases} \quad (11)$$

Для решения системы уравнений (11) используем метод Ньютона [15], представляющий собой итерационный алгоритм вида:

$$x_{i+1} = x_i - J^{-1}(x_i) \cdot F(x_i), \quad (12)$$

где  $x_i$ — $i$ -е приближение вектора решений;  $J^{-1}(x_i)$ —обратная матрица Якоби;  $F(x_i)$ —вектор решений, рассчитанный на основании приближения  $x_i$  по уравнениям системы.

Для системы уравнений (11) имеем матрицу Якоби вида:

$$J(x^{(i)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(x_i)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1(x_i)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1(x_i)}{\partial x_3} & \frac{\partial F_1(x_i)}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_2(x_i)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2(x_i)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2(x_i)}{\partial x_3} & \frac{\partial F_2(x_i)}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_3(x_i)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3(x_i)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3(x_i)}{\partial x_3} & \frac{\partial F_3(x_i)}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_4(x_i)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_4(x_i)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_4(x_i)}{\partial x_3} & \frac{\partial F_4(x_i)}{\partial x_4} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Итерационный процесс заканчивается при выполнении условия:

$$|x_{i+1} - x_i| \leq \varepsilon, \quad (14)$$

где  $\varepsilon$ — заданная точность решения.

В результате произведенных итераций окончательно получаем вектор решений системы (11):

$$x_i = \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ x \\ y \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Уравнение искомой касательной  $BD$  имеет следующий вид:

$$\frac{(x - x_B)}{(x_D - x_B)} = \frac{(y - y_B)}{(y_D - y_B)}. \quad (16)$$

По полученным аналитическим уравнениям строим профиль зуба рамной пилы (рис. 2).

Расчет площади межзубовой впадины выполняется в программе Mathcad согласно расчетной схеме (рис. 1), путем сложения площадей составляющих ее фигур.

Далее с применением метода наименьших квадратов в результате твердотельного моделирования в программе SolidWorks [16] были получены математические модели, описывающие основные параметры рамной пилы:

- площадь межзубовой впадины —  $S_{vp}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ ;
- продолжительность работы пилы —  $T(\sigma_{\max}, \sigma_{\min})$ ;
- устойчивость зуба пилы, которая соответствует величине отклонения зуба при воздействии нагрузки по задней его грани —  $y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ .

Аргументами данных функций являются:  $x_1$ — высота зуба рамной пилы;  $x_2$ — длина ломаной задней грани зуба пилы;  $x_3$ — радиус межзубовой впадины;  $x_4$ — задний угол;  $x_5$ — передний угол;  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ — максимальное и минимальное напряжения, характеризующие напряженно-деформированное состояние рамной пилы в процессе резания и при холостом ходе соответственно, влияющие на продолжительность работы пилы при переменных напряжениях.

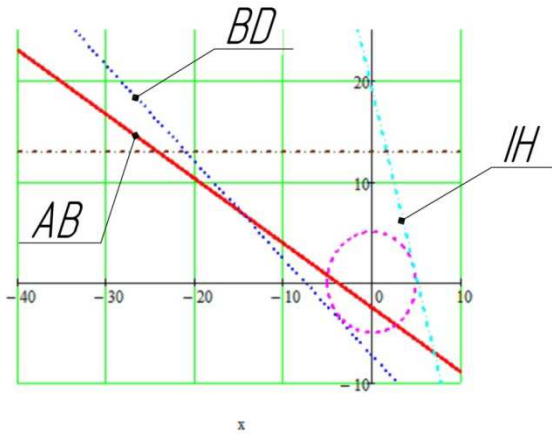


Рис. 2. Аналитическое построение профиля зуба рамной пилы

Решая задачу оптимизации, находим такие значения аргументов  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ , при которых значения функций  $S_{vp}$  и  $T$  были бы максимальны, а значения функции  $y$  минимальны. Целевые функции можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} S_{vp}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \rightarrow \max, \\ T(\sigma_{\max}, \sigma_{\min}) \rightarrow \max \\ y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (17)$$

Ограничениями в поиске решения для аргументов  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  являются следующие условия:

$$\begin{aligned} -1 < x_1 < 1, \\ -1 < x_2 < 1, \\ -1 < x_3 < 1, \\ -1 < x_4 < 1, \\ -1 < x_5 < 1, \\ T \leq 8. \end{aligned} \quad (18)$$

Последнее из условий (18) учитывает особенности эксплуатации рамных пил при распиловке мерзлой древесины и определяет продолжительность работы пилы. Для решения данной задачи используется алгоритм оптимизации входных параметров методом перебора с задаваемым шагом.

Значения функции  $T(\sigma_{\max}, \sigma_{\min})$  определяются в программе оптимизации с использованием алгоритма численного интегрирования Гаусса.

Точность получаемого решения определяет шаг перебора, принятый при оптимизации равным 0,01.

Значения варьируемых входных параметров в нормализованных и натуральных обозначениях факторов, полученные в результате оптимизации, представлены в табл.1.

Таким образом, были определены оптимальные значения линейных и угловых параметров профиля зубьев рамной пилы для различных величин шага зуба  $t_3$ , используемых при рамном пиленнии мерзлой древесины.

Таблица 1

Результаты оптимизации

Шагзуба пилы, $t_3$ , мм	$\frac{x_1}{h, \text{ м м}}$	$\frac{x_2}{l, \text{ м м}}$	$\frac{x_3}{r, \text{ м м}}$	$\frac{x_4}{\alpha, \text{ }^\circ}$	$\frac{x_5}{\gamma, \text{ }^\circ}$	$S_{vp}, \text{ мм}^2$	$T, \text{ час.}$	$y, \text{ мм}$
26	$\frac{-0,15}{17,7}$	$\frac{-0,34}{10,65}$	$\frac{1}{6,0}$	$\frac{0,3}{25,6}$	$\frac{-0,77}{13,46}$	272,12	7,92	0,274
32	$\frac{-0,17}{21,66}$	$\frac{-0,22}{13,56}$	$\frac{0,87}{6,87}$	$\frac{0,48}{23,96}$	$\frac{-0,7}{15,6}$	396,16	6,33	0,487
40	$\frac{-0,21}{27,08}$	$\frac{-0,3}{16,9}$	$\frac{0,94}{8,44}$	$\frac{0,56}{22,12}$	$\frac{-0,86}{17,28}$	610,96	4,18	0,585

Расчет силовых параметров процесса пиления перед 3D-моделированием зубьев пил выполнен с использованием прикладной программы Frame\_Saw [17], которая позволяет определять усилия резания при различных условиях работы рамной пилы.

Рассчитанные программой Frame\_Saw значения силы резания являются усредненными и не учитывают особенности распиловки древесины в зимний период. Для уточнения величины действующей силы резания дополнительно используются уравнения, описанные в исследовании [18], которые позволяют учесть влияние переднего  $\gamma$  и заднего  $\alpha$  углов зуба пилы в случае пиления мерзлой древесины.

Расчет производится при трех значениях шага зуба  $t_3$  рамной пилы. Значения температуры ( $t$ ), посылки ( $\Delta$ ), диаметра бревна ( $d$ ), переднего угла ( $\gamma$ ), заднего угла зуба пилы ( $\alpha$ ) представлены в табл.2.

Таблица 2  
Значения параметров  $t, \Delta, d, \gamma, \alpha$

Шаг зуба пилы, $t_3$ , мм	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta, \text{ мм/об.}$	$d, \text{ см}$	$\gamma, \text{ град.}$	$\alpha, \text{ град.}$
26	-15	30	20	13÷17	23÷27
32	-15	25	30	15÷19	21÷25
40	-15	17,7	40	17÷21	19÷23

Твердотельная имитационная модель, созданная в среде SolidWorks, используется для оценки прочности и анализа устойчивости зубьев рамной пилы в процессе пиления древесины.

В результате моделирования методом конечных элементов были определены значения максимальных напряжений и отклонений зуба пилы при деформированном состоянии. Установлена локализация макси-

мальных напряжений в межзубовой впадине рамной пилы в процессе пиления мерзлой древесины. Напряженное состояние рамной пилы моделировалось при нагрузке как по передней, так и по задней грани зуба.

Эпюра напряжений в зубе пилы (рис. 3а), распределение напряжений от нагрузки по передней (рис. 3б) и задней граням(рис. 3в) зуба модели рамной пилы изображены на рис.3.

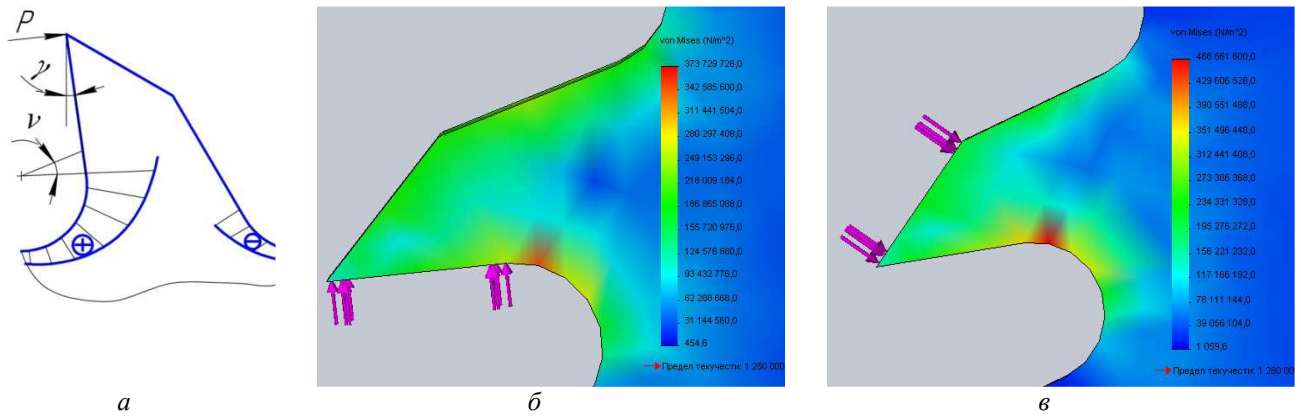


Рис.3. Распределение напряжений при нагрузке по передней и задней граням зуба рамной пилы

Программа SolidWorks позволяет рассчитывать величины напряжений в теле пилы, в том числе при циклическом напряжении. Выполненная в процессе конструирования проверка зуба пилы на усталость дает возможность оценить допустимую продолжительность работы рамной пилы, изготовленной из стали 9ХФ, в условиях, близких к реальным производственным.

В механике разрушения для описания скорости роста трещины используются формулы, предложенные P.S. Peris, R.G.Forman, J.M.Barsom [19].Нами применялся вариант теории роста усталостных трещин, разработанный Г.П. Черепановым.

Уравнение (19) позволяет наиболее полно учесть особенности развития трещин в стальных рамных пилах:

$$\frac{dl'}{dn_y} = -\omega \cdot \left( \frac{K_{1max}^2 - K_{1min}^2}{K_C^2} + \ln \frac{K_C^2 - K_{1max}^2}{K_C^2 - K_{1min}^2} \right), \quad (19)$$

где  $\omega$ —характеристика материала, определяющая прирост трещины за цикл нагружения;  $K_{1max}$ ,  $K_{1min}$ —максимальный и минимальный за цикл коэффициенты

интенсивности напряжений,  $H/мм^{3/2}$  [20];  $K_C$ —критический коэффициент интенсивности напряжений, который определяет механические свойства материала (вязкость разрушения),  $H/мм^{3/2}$  [20].

Интегрируя зависимость скорости развития трещин, получаем выражение для определения числа циклов нагружения  $n_{Ц}$ , необходимых для развития трещины от ее начальной длины  $l'_n$  до некоторой конечной  $l'_к$ :

$$n_{Ц} = -\frac{1}{\omega} \cdot \int_{l'_n}^{l'_к} \frac{dl'}{\frac{K_{1max}^2 - K_{1min}^2}{K_C^2} + \ln \frac{K_C^2 - K_{1max}^2}{K_C^2 - K_{1min}^2}}. \quad (20)$$

Начальную длину трещины  $l'_n$  можно принять равной глубине риски, получающейся при заточке пилы. На практике глубина риски может достигать 0,1 мм. Приравняв в формуле (20) конечную длину трещины к толщине слоя  $\delta$ ,стачиваемого при заточке, и проведя преобразования, получаем выражение для расчета допустимой продолжительности работы рамной пилы  $T$ :

$$T = \frac{-1}{\omega \cdot n_B \cdot K_{ЦСП60}} \int_{l'_n}^{\delta} \frac{dl'}{\frac{3,94 \cdot (\sigma_{max}^2 - \sigma_{min}^2) \cdot l'}{K_C^2} + \ln \frac{K_C^2 - 3,94 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot l'}{K_C^2 - 3,94 \cdot \sigma_{min}^2 \cdot l'}}. \quad (21)$$

Интеграл в формуле (21) не выражается через элементарные функции, поэтому интегрирование производим численным методом Гаусса в среде программирования Delphi.

Для получения математических моделей использован план На-5 для пяти факторов в нормализованных обозначениях. Расчеты выполнялись в прикладной программеВ-plans[21]. В качестве факторов выбраны основные линейные и угловые параметры, определяющие профиль зуба рамной пилы согласно ГОСТ 5524: $h$ —высота зуба( $x_1$ );  $l$ —длина ломаной задней грани зуба ( $x_2$ );  $r$ —радиус межзубовой впадины ( $x_3$ );  $\alpha$  — задний угол зуба ( $x_4$ );  $\gamma$  —передний угол зуба ( $x_5$ ).

Диапазоны варьирования факторов для трех значений шага зубьев  $t_3$ рамных пил, регламентированных ГОСТ 5524, представлены в табл.3.

Таблица 3

Диапазоны варьирования линейных и угловых параметров рамной пилы

Шаг зуба пилы, $t_3$ , мм	$h$ , мм	$l$ , мм	$r$ , мм	$\alpha$ , град.	$\gamma$ , град.
26	16÷18	9÷14	4÷6	23÷27	13÷17
32	20÷24	12÷16	5÷7	21÷25	15÷19
40	25,5÷29,5	15,5÷19,5	6,5÷8,5	19÷23	17÷21

Для получения уравнений используем метод наименьших квадратов, записанный в матричной форме вида:

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (22)$$

где  $X$ —матрица базисных функций, столбцы которой соответствуют коэффициентам получаемого уравнения;  $Y$ —вектор выходных параметров, значения которых получены аналитическим расчетом, методом конечных элементов при твердотельном моделировании в среде SolidWorks.

Общий вид уравнений математических моделей запишется как:

$$T(\sigma_{\max}, \sigma_{\min}) = f(\sigma_{\max}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5), \sigma_{\min}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)) \quad (24)$$

Таким образом, разработаны математические модели, связывающие линейные и угловые параметры зубьев рамной пилы с площадью межзубовой впадины, с усталостной прочностью, характеризуемой величинами максимальных и минимальных напряжений, с продолжительностью работы пилы и устойчивостью ее зубьев.

В результате оптимизации были определены значения линейных и угловых параметров зубьев конструкции рамной пилы со стандартизованными шагом  $t_3$ , используемым при рамном пиленнии мерзлой древесины. Результаты оптимизации представлены в табл.1.

### Выводы

1. Получены аналитические уравнения, позволяющие рассчитывать в программе Mathcad площадь межзубовой впадины для задаваемых при конструировании инструмента геометрических параметров зубьев пил.

2. Методом конечных элементов при твердотельном моделировании в среде SolidWorks определены максимальные и минимальные (начальные) напряжения в зубе рамной пилы при нагрузке, действующей по передней и задней граням.

3. Установлены локализация и величина максимальных напряжений в межзубовой впадине рамной пилы.

4. Обоснована допустимая продолжительность работы рамной пилы, определяемая усталостной прочностью металла при циклической нагрузке.

5. Установлены оптимальные значения линейных и угловых параметров зубьев конструкции рамной пилы со стандартизованным шагом для распиловки мерзлой древесины.

6. Методика конструирования инструмента с использованием методов математического и твердотельного моделирования может быть рекомендована для внедрения в практику конструирования дереворежущего инструмента, эксплуатируемого при различных климатических условиях.

### Литература:

1. Остроумов И.П. Пособие для рабочего лесопильной рамы. М.: Лесная промышленность, 1988. 87 с.
2. Хасдан С.М. Пособие для рабочего лесопильной рамы. М.: Лесная промышленность, 1966. 88 с.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (23)$$

где  $b_0$ —свободный член уравнения;  $b_i \cdot x_i$ —линейные коэффициенты;  $b_{ii} \cdot x_i^2$ —квадратичные коэффициенты;  $b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ —парные взаимодействия.

Уравнения, полученные для определения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ , используются для расчетов допустимой продолжительности работы рамной пилы  $T$  и устойчивости зубьев пилы, которая соответствует величине отклонения зуба при воздействии нагрузки по его задней грани.

Функция для расчета продолжительности работы пилы  $T$  в общем виде может быть записана:

3. Прокофьев Г.Ф. Определение критической силы поперечной пилы. Общий случай // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2008. № 3. С. 81 – 87.

4. Воронцов А.Л., Султан-заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Новая теория резания // Справочник. Инженерный журнал: прил. 2007. № 9. С. 64.

5. Фонкин В.Ф. Лесопильные станки и линии. М.: Лесная промышленность, 1980. 320 с.

6. Forman R.G. Effect of plastic deformation on the strain energy release rate in a centrally notched plate subjected to uniaxial tension. ASME paper 65 – WA/MET-9, 1965.

7. Суханов В.Г., Зайцев В.В. Некоторые рекомендации по выбору оборудования и инструмента для продольного пиления древесины // Вестн. МГУЛа – Лесной вестник. 2005. № 1. С. 88-93.

8. Сморгон Л.С. Особенности распиловки крупномерной лиственницы на лесопильных рамах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1969. 28 с.

9. Серегин Н., Соломина А. Новые горизонты применения пилорам // Дерево. RU. 2009. № 1. С. 52-58.

10. Курицын В.Н. Теоретические основы механической обработки мерзлой древесины: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2009. 165 с.

11. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления мерзлой древесины лиственницы на двухэтажных лесопильных рамах / СибНИИЛП. Красноярск, 1975. 44 с.

12. Корчма И.С. Исследовать и разработать режимы пиления и подготовки к распиловке мерзлой древесины лиственницы и других хвойных пород: а.с. 504648) Разработать предложения по распиловке лиственничной древесины на лесопильных рамах в зимних условиях // Науч. тр. СибНИИЛП: Красноярск, 1979. 95 с.

13. Корчма И.С., Карлов Г.П. Теория и конструкция деревообрабатывающего оборудования. Проектирование деревообрабатывающего оборудования. Выбор режимов и оборудования для распиловки и подготовки лиственницы к распиловке. Красноярск: СибГТУ, 2000. 76 с.

14. Руководящие технические материалы по определению величин посылок при распиловке бревен и брусьев хвойных пород на лесопильных рамах пилами с плющеными зубьями. М.: ЦНИИТЭИлеспром, 1966. 61 с.

15. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

16. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 400 с.

17. Воробьев А.А., Вишуренко Н.В., Корчма И.С. «Frame\_Saw»: программа для ЭВМ. Св. о гос. рег. № 2012616762 Рос.

Федерация. СибГТУ. Заявка № 2012614505 от 04.06.2012; зарег. 27.07.2012.

18. Корчма И.С. Исследование влияния геометрических параметров зубьев пил на процесс распиловки мерзлой древесины лиственницы на лесопильных рамах: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1975. 243 с.

19. Котович А.В., Станкевич И.В. Решение задач теории упругости методом конечных элементов [Электронный ресурс] М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 106 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/52244>. Загл. с экрана.

20. Богданов Е.А., Остроумов И.П. Подготовка и эксплуатация рамных пил. М.: Лесная промышленность, 1986. 160 с.

21. Воробьев А.А., Спицын, И.Н., Вишуренко, Н.В. «B\_plans»: программа для ЭВМ. Св. о гос. рег. № 011616377 Рос. Федерация. СибГТУ. Заявка № 2011614464 от 16.06.2011; зарег. 15.08.2011.

### References

1. Ostroumov I.P. Handbook for working frame saw. M.: Lesnaya promyshlennost', 1988. 87 p.

2. Hasdan S.M. Handbook for working frame saw. M.: Lesnaya promyshlennost', 1966. 88 p.

3. Prokof'ev G.F. Determination of the critical power of the band saw. General case // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2008. № 3. P. 81-87.

4. Voroncov A.L., Sultan-zade N.M., Albagachiev A.Yu. New cutting theory // Handbook. An Engineering Journal: pril. 2007. № 9. 64 p.

5. Fonkin V.F. Sawing machines and lines. M.: Lesnaya promyshlennost', 1980. 320 p.

6. Forman R.G. Effect of plastic deformation on the strain energy release rate in a centrally notched plate subjected to uniaxial tension. ASME paper 65 - WA/MET-9, 1965.

7. Cuhanov V.G., Zajcev V.V. Some recommendations on the choice of equipment and tools for longitudinal sawing of wood // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2005. № 1. P. 88-93.

8. Smorgon L.S. Features sawing large larch on sawmill frames: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1969. 28 p.

9. Seregin N., Solomina A. New horizons for the use of sawmills // Derevo. RU. 2009. № 1. P. 52-58.

10. Kuricyn V.N. Theoretical bases of mechanical processing of frozen wood: monogr. Krasnoyarsk: SibGTU, 2009. 165 p.

11. Guiding technical materials on the determination of the regime of sawing frozen larch wood on double-deck sawmills / SibNIILP. Krasnoyarsk, 1975. 44 p.

12. Korchma I.S. To research and develop cutting and preparation modes for sawing frozen wood of larch and other softwood (a.s. 504648) to Develop proposals for cutting larch wood on sawmills in winter conditions // Nauch. tr. SIBNIILP: Krasnoyarsk, 1979. 95 p.

13. Korchma I.S., Karlov G.P. Theory and design of wood-working equipment. Design of woodworking equipment. Selection of modes and equipment for cutting and preparing larch for cutting: study guide. Krasnoyarsk: SibGTU, 2000. 76 p.

14. Guiding technical materials for determining the quantities of parcels when sawing logs and bars of coniferous species on sawmill frames with saws with flattened teeth. M.: CNIITEHIlle-sprom, 1966. 61 p.

15. Alyamovskij A.A. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice. SPb.: BHV-Peterburg, 2008. 1040 p.

16. Formalev V.F., Reviznikov D.L. Numerical methods. M.: FIZMATLIT, 2006. 400p.

17. Vorob'ev A.A., Vishurenko N.V., Korchma I.S. "Frame\_Saw". Certificate of state registration of computer programs for EVM. № 2012616762 Ros. Federaciya. SibGTU. Zayavka № 2012614505 ot 04.06.2012; zareg. 27.07.2012.

18. Korchma I.S. Research of influence of geometrical parameters of teeth of saws on process of sawing up of frozen wood of a larch on sawmills: dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 1975. 243 p.

19. Kotovich A.V., Stankevich I.V. Solving the problems of the theory of elasticity by the finite element method [Elektronnyj resurs] M.: MGTU im. N.EH. Baumana, 2012. 106 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/52244>. Zagl. s ehkrana.

20. Bogdanov E.A., Ostroumov I.P. The exploitation of frame saws. M.: Lesnaya promyshlennost', 1986. 160 p.

21. Vorob'ev A.A., Spicyn, I.N., Vishurenko, N.V. "B\_plans". Certificate of state registration of computer programs for EVM. № 011616377 Ros. Federaciya. SibGTU. Zayavka № 2011614464 ot 16.06.2011; zareg. 15.08.2011.