

Научная статья

УДК 621.365.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-146-154

### Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы

**В.И. Мелехов**, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: Q-1051-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>*

**И.И. Соловьев**<sup>✉</sup>, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: ABE-7412-2020*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 22.04.22 / Одобрена после рецензирования 26.07.22 / Принята к печати 03.08.22

**Аннотация.** Эффективность работы круглопильного станка определяется работоспособностью и эксплуатационной надежностью дереворежущего инструмента. В процессе работы полотно круглой пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов. Способность пилы противодействовать возмущающим силам резания складывается из жесткости и устойчивости ее полотна. Круглая пила представляет собой тонкий стальной диск с центральным отверстием и зубчатой режущей кромкой. Диск круглой пилы имеет 3 зоны: периферийную, среднюю и центральную. Наибольшее влияние на устойчивость полотна пилы оказывают средняя и периферийная части диска. Для придания пиле работоспособности в ее полотне формируют созданием пластической деформацией граничных радиальных полосовых участков секторные зоны. В отечественной и мировой практике обработка таких участков выполняется проковкой. Нормированные напряжения в полотне круглой пилы получают локальным механическим контактным воздействием рабочего органа пилоправного инструмента по размеченным радиусам полотна пилы с формированием полосовых участков пластической деформации металла с нормально направленными к радиусу разносторонними напряжениями. При этом со стороны смежных секторов появляются контрнапряжения, приводящие к взаимному «отталкиванию» секторов и появлению напряжений сжатия, компенсирующих силы центробежного ускорения, температурного нагрева отдельных зон полотна пилы, внешних продольных и поперечных изгибающих сил, возникающих в полотне пилы при обработке древесины. Суммарное взаимодействие всех смежных секторов обеспечивает натяжение полотна пилы и устойчивость инструмента. Создание радиальных полосовых участков проковкой имеет существенные недостатки, для устранения которых предложен принципиально новый подход – формирование секторных полей остаточных напряжений в полотне пилы тепловым воздействием, заключающимся в создании нормированных остаточных термопластических напряжений в пильном полотне кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массивы локальных радиально расположенные по полотну пилы полосовых участков. В результате проведенных исследований определены границы участков теплового воздействия на полотно пилы и диапазон температур, обеспечивающий формирование нормированных остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при концентрированном импульсном нагреве массива радиальных полосовых участков.

**Ключевые слова:** круглая пила, термопластические напряжения, устойчивость, концентрированное тепловое воздействие

**Для цитирования:** Мелехов В.И., Соловьев И.И. Формирование секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 146–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-146-154>

Original article

## Formation of Sectoral Residual Thermoplastic Tension Fields in Circular Saw Blade

**Vladimir I. Melekhov**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

**Ivan I. Solovlev**<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [v.melekhov@narfu.ru](mailto:v.melekhov@narfu.ru), [i.solovlev@narfu.ru](mailto:i.solovlev@narfu.ru)<sup>✉</sup>

Received on April 22, 2022 / Approved after reviewing on July 26, 2022 / Accepted on August 03, 2022

**Abstract.** The efficiency of a stationary circular saw is determined by the performance and operational reliability of the woodcutting unit. During operation, the circular saw blade is exposed to a variety of complex loads and thermal conditions. The rigidity and stability of the saw blade determine its capacity to resist the perturbing cutting forces. The cutting compound itself is a thin disc made of steel with a hole in the middle that has a serrated cutting edge. It consists of three areas: peripheral, middle, and central. The stability of the saw blade is determined by the middle and peripheral parts. The increase in durability is achieved by plastic deformation to form the strip boundaries of the radial sections. These parts are treated by forging in both national and international practice. Normalization of loads on the blade in case of local mechanical contact with the working body is formed in the strip boundaries of the radial sections through the formation of places with plastic deformation of the metal, which rearrange the loads and place them in the radial direction. At the same time, countertension appears from the adjoining sections, leading to mutual “repulsion” of them and the creation of compressive tension that compensates for the forces of centrifugal acceleration, thermal heating of separate areas of the saw blade, external longitudinal and transverse bending tension that arise during wood processing. The combined interaction of all adjoining sections provides the tension and stability of the saw blade. The creation of the radial sections by forging has some significant disadvantages. Their elimination requires a fundamentally new approach, such as the formation of the residual stress sections in the saw blade by thermal exposure. It creates a normalized residual thermoplastic tension in the saw blade by a short-time (1–2 s) focused thermal influence on the strip boundaries of the radial sections. The results of the conducted research determined the boundaries of the sections for thermal treatment and the temperature range, which ensure the formation of normalized residual thermoplastic tension in the circular saw blade through concentrated pulsed heating of the strip edges of radial sections.

**Keywords:** circular saw, thermoplastic tension, stability, focused thermal exposure

**For citation:** Melekhov V.I., Solovev I.I. Formation of Sectoral Residual Thermoplastic Tension Fields in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 146–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-146-154>

### Введение

На лесопильно-деревообрабатывающих предприятиях применяют круглопильные станки, рабочим инструментом которых является круглая пила. Эффективность работы станка определяется работоспособностью и эксплуатационной надежностью дереворежущего инструмента.

В процессе работы полотно круглой пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов [4, 11, 13, 14, 16, 18, 19]. Неравномерный нагрев полотна по радиусу пилы от действия сил трения и силы сопротивления резанию вызывают деформацию пильного полотна, приводящую к возникновению внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Работоспособность пилы, сохранение ей плоской формы равновесия зависят от жесткости и устойчивости полотна пилы.

Круглая пила – тонкий стальной диск с центральным отверстием и зубчатой режущей кромкой. Принято рассматривать диск круглой пилы как состоящий из 3 зон: периферийной, средней и центральной [12–14]. На устойчивость полотна пилы в наибольшей степени влияют средняя и периферийная части диска.

В исходном состоянии полотно подготовленной круглой пилы имеет плоскую форму равновесия, которая может быть нарушена при определенном внешнем воздействии на пилу в процессе резания, что вызывает отклонение диска и режущей кромки пилы от исходного состояния, потерю устойчивости и снижение точности обработки древесины. Для придания работоспособности пиле в ее полотне формируют посредством создания граничных радиальных полосовых участков механической пластической деформацией секторные зоны. В отечественной и мировой практике обработка таких участков выполняется так называемой секторной проковкой [12–14]. Нормированные напряжения в полотне круглой пилы получают локальным механическим контактным воздействием рабочего органа пилоправного инструмента по размеченным радиусам полотна пилы. При этом формируют полосовые участки пластической деформации металла с нормально направленными к радиусу разносторонними напряжениями  $\sigma_{пл.}$  (рис. 1). Как следствие, со стороны смежных секторов появляются контрнатяжения  $\sigma_{кн.}$ , приводящие

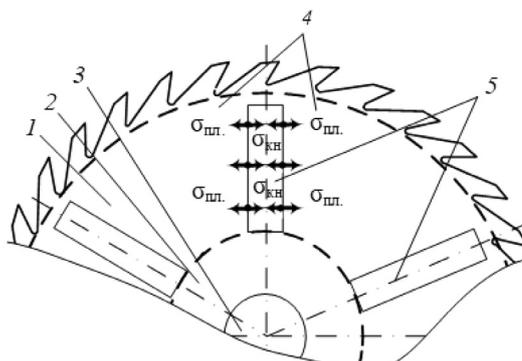


Рис. 1. Механические пластические напряжения в круглой пиле: 1 – полотно пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – центральное отверстие; 4 – секторы; 5 – радиальные полосовые участки  
Fig. 1. Mechanical plastic tension in circular saw blade: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – central hole; 4 – sectors; 5 – radial strip sections

к взаимному «отталкиванию» секторов и созданию напряжений сжатия, компенсирующих силы центробежного ускорения, температурного нагрева отдельных зон полотна пилы, внешних продольных и поперечных изгибающих сил, возникающих в полотне при обработке древесины. Суммарное взаимодействие всех смежных секторов приводит к натяжению полотна пилы, что обеспечивает устойчивость инструмента.

Глубина следа проковки на поверхности полотна от ударов бойка проковочного инструмента достигает 0,05 мм (ГОСТ 980–80. «Пилы круглые плоские для распиловки древесины. Технические условия»), поэтому напряжения растяжения при механическом воздействии на полосовой участок возникают только в поверхностном слое, не распространяясь в глубину диска пилы, и не обеспечивают формирования равномерного поля напряжений по толщине полотна пилы [12–14]. В материале полотна между прокованными поверхностными слоями полосового участка поле напряжений остается неизменным. При дополнительном воздействии на полотно пилы, например тепловом, нарушается баланс разнонаправленных напряжений (тепловых, поверхностных и внутренних) и увеличивается риск потери плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы.

Для устранения недостатков секторной проковки предложена принципиально новая технология. Предложено формировать секторные поля остаточных напряжений в полотне пилы термопластическим воздействием, которое заключается в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массив радиально расположенных по полотну пилы полосовых участков [6–8, 16]. Это обеспечит равномерное распределение напряжений в материале инструмента по всему массиву полосового участка и однородность структуры полей напряжений.

Исследований в этом направлении ранее не проводилось. Для обоснования режимов подготовки полотна пилы концентрированным тепловым воздействием на радиальные локальные полосовые участки полотна выполнены целенаправленные исследования.

#### *Объекты и методы исследования*

Рассматриваемая технология подготовки круглой пилы к работе основывается на тепловом способе [4, 6–12, 16] создания напряжений в полотне пилы импульсным индукционным нагревом радиально расположенных полосовых участков, которые являются граничными для смежных секторов полотна. При нагревании массива полосовых участков образуются позонно расположенные по полотну пилы нормально к радиусу диска разнонаправленные тепловые напряжения  $\sigma_{\text{тем}}$ , превышающие предел текучести (упругости)  $\sigma_{0,2}$  материала полотна. При этом в массиве участка возникают вторичные термопластические остаточные деформации [1–10, 15–17], обеспечивающие формирование в граничной зоне смежных секторов полотна пилы разносторонних остаточных термопластических напряжений  $\sigma_{\text{пл}}$  (рис. 2). Под воздействием этих напряжений проявляется эффект натяжения полотна круглой пилы вследствие взаимного отталкивания смежных секторов и достигается устойчивость пилы в процессе работы.

Количественная оценка остаточных термопластических напряжений при нагревании массива радиального полосового участка и изменений полей остаточных термопластических напряжений по границе смежных секторов полотна пилы выполнена с учетом динамических и температурных напряжений, возникающих в процессе работы пилы, по математической модели, ранее рассмотренной в работах [6, 7].

Для определения зоны теплового воздействия на полотне пилы и пределов температур, вызывающих формирование остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при импульсном индукционном нагреве радиального полосового участка смоделирован процесс формирования радиальных полосовых полей остаточных напряжений в полотне пилы. При этом приняты во внимание динамические напряжения в полотне круглой пилы, обусловленные вращением, и неравномерные температурные напряжения. Размерные характеристики пилы: диаметр – 500 мм; толщина – 2,5 мм; диаметр центрального отверстия – 50 мм; зажимной фланец – 100 мм. Материал полотна пилы – сталь 9ХФ (ГОСТ 5950–2000. «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия»). Характеристики полотна пилы: модуль упругости  $E = 196,1$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,27$ ; плотность стали  $\gamma = 7,86 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , определяемый по графику зависимости предела текучести стали от температуры, МПа; средний коэффициент линейного расширения  $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6}$  ед./°С.

При пилении древесины периферийная зона диска пилы нагревается больше центральной [13, 14]. Температурный градиент  $\Delta T$  по радиусу диска и соответствующие радиальные и тангенциальные составляющие температурных напряжений приводят к потере баланса напряжений и плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы. Тангенциальные составляющие температурных напряжений оказывают большее влияние на устойчивость полотна пилы [10].

Для оценки характера распределения тангенциальных составляющих напряжений  $\sigma_{\theta T}$  при перепаде температур по радиусу пильного диска применена функция [12, 14]:

$$\sigma_{\theta T} = \Delta T \alpha E \left[ n_1 \eta_1 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1 - 1} + (n_1 + 1) \eta_2 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1} - \eta_3 \left( \frac{r}{R} \right)^{-2} + \eta_4 \right],$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала полотна пилы;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  – функции, определяемые показателем степени  $n_1$  в законе распределения температур [15] отношением диаметра фланца к диаметру диска пилы и отношением температур центральной и периферийной зон диска;  $r$  – текущий (рассматриваемый) радиус, м;  $R$  – радиус пилы, м.

При выполнении расчетов принято  $n_1 = 3$ , диаметр фланца – 100 мм,  $\Delta T = 60$  °С, тогда  $\eta_1 = 0,042$ ;  $\eta_2 = -0,179$ ;  $\eta_3 = -5,705 \cdot 10^{-3}$ ;  $\eta_4 = 0,143$ .

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Mathcad.

Тангенциальные составляющие динамических напряжений  $\sigma_\theta$ , возникающих при вращении пилы во время работы, определяются из выражения [7, 12, 14]:

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma v^2}{8} \left\{ -\left(1 + 3\mu\right) \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \mu_1 c^2 - \left(\frac{r}{R}\right)^{-2} \frac{\left(\mu_1 \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \mu_2 c^2\right) \left(\mu_1 c^2 - (3 + \mu)\right)}{\mu_1 + \mu_2 c^2} \right\},$$

где  $\gamma$  – плотность стали;  $v$  – окружная скорость вращения пилы, м/с;  $c = r_\phi / R$ ,

где  $r_\phi$  – радиус зажимного фланца;  $\mu$  – коэффициент Пуассона ( $\mu = 0,3$ ;  $\mu_1 = 1 + \mu$ ;  $\mu_2 = 1 - \mu$ ).

### Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости тангенциальных составляющих температурных и динамических напряжений приведены на рис. 2.

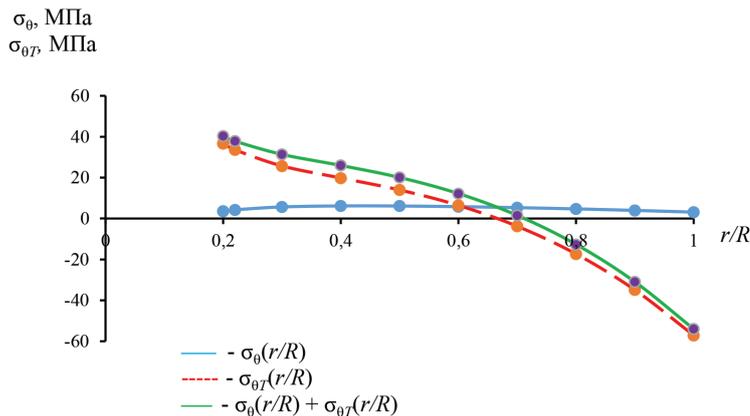


Рис. 2. Распределение тангенциальных составляющих температурных и динамических напряжений по радиусу пилы

Fig. 2. Distribution of tangential components of temperature and dynamic loads along the blade radius

Анализ зависимостей показывает, что возникающие под действием центробежных сил тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  являются растягивающими по всему радиусу пилы, а неравномерный нагрев по радиусу круглой пилы вызывает знакопеременные тангенциальные напряжения  $\sigma_{\theta T}$  (растяжения в средней зоне полотна и напряжения сжатия в периферийной). Точка перехода суммарных тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta T} + \sigma_\theta$  растяжения в напряжения сжатия находится на относительном радиусе  $r/R = 0,65$ . Напряжения сжатия в периферийной зоне способствуют ослаблению зубчатой кромки, потере плоской формы упругого равновесия диска и устойчивости пилы.

Для обеспечения работоспособности пилы напряжения сжатия необходимо компенсировать, что достигается созданием соответствующих остаточных термопластических напряжений [1, 6–8].

Поле остаточных термопластических напряжений в полотне пилы формируется первоначальными тепловыми деформациями [1–5] (рис. 3).

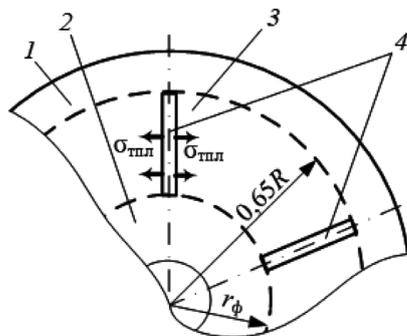


Рис. 3. Термопластические напряжения в радиальном полосовом участке: 1 – диск пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – сектор; 4 – радиальные полосовые участки

Fig. 3. Thermoplastic loads in the radial strip section: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – sectors; 4 – radial strip sections

При нагреве массива полосового участка до температуры  $t$  в нем возникают тепловые напряжения [1]:

$$\sigma_t(t) = -E\alpha(t)t.$$

Зависимости тепловых напряжений  $\sigma_t(t)$  и предела текучести стали 9ХФ  $\sigma_{0,2}(t)$  приведены на рис. 4.

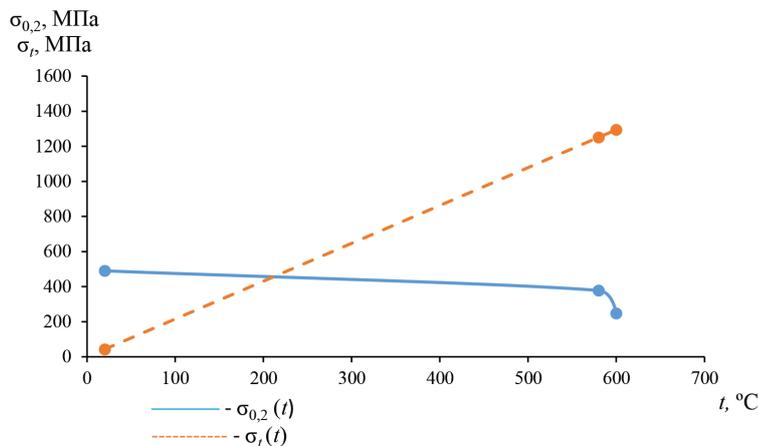


Рис. 4. Температурные напряжения и предел текучести стали 9ХФ в зависимости от температуры

Fig. 4. Temperature loads and yield strength of 9XF steel depending on temperature

Из анализа зависимостей следует, что при  $t = 220$  °С и выше тепловые напряжения  $\sigma_t$  превышают предел текучести  $\sigma_{0,2}$  стали 9ХФ. При этом тепловое воздействие вызывает остаточные термопластические напряжения на границе массива радиального полосового участка  $\sigma_{\text{тпл}} \approx \sigma_{0,2}$  [1].

Из-за нагревания массива полосовых участков по радиусам пилы на участке, ограниченном окружностями зажимного фланца и радиусом  $r = 0,65R$ , образуются сжимающие остаточные термопластические напряжения в средней

зоне и напряжения растяжения в периферийной зоне диска. При этом сжимающие температурные напряжения в периферийной зоне от неравномерного нагрева пилы в процессе работы взаимно уравниваются и компенсируются.

### Заключение

Формирование нормированных секторных полей остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы концентрированным импульсным тепловым воздействием на радиальные граничные полосовые участки позволяет усовершенствовать технологию подготовки пилы, обеспечить плоскую форму упругого равновесия полотна и устойчивость круглой пилы в работе.

В результате проведенных исследований определены границы участков теплового воздействия на полотно пилы и диапазон температур, обеспечивающий формирование нормированных остаточных термопластических напряжений в полотне круглой пилы при концентрированном импульсном нагреве массива радиальных полосовых участков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.  
Birger I.A. *Residual Tensions*. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo «Mashinostroyeniye» Publ., 1963. 232 p. (In Russ.).
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.  
Bogatov A.A. *Mechanical Properties and Models of Metal Destruction*. Yekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2002. 329 p. (In Russ.).
3. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. Уральская научно-педагогическая школа им. проф. А.Ф. Головина, Екатеринбург, 29 окт.–1 нояб. 2012 г. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2013. С. 95–101.  
Bogatov A.A. Residual Tensions and Metal Destruction. *Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering: Proceedings of the 6th International Scientific-Practical Conference of Ural Scientific-Pedagogical School named after Professor A.F. Golovin, Yekaterinburg, 29 October – 1 November 2012*. Yekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2013, pp. 95–101. (In Russ.).
4. Боровиков Е.М., Орлов Б.Ф. Термический способ подготовки круглых пил к работе // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 6. С. 90–94.  
Borovikov E.M., Orlov B.F. Thermal Treatment of Circular Saws. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1974, no. 6, pp. 90–94. (In Russ.).
5. Бородин И.Н., Майер А.Е., Петров Ю.В., Груздков А.А. Максимум предела текучести при квазистатической и высокоскоростной пластической деформации металлов // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 12. С. 2384–2393.  
Borodin I.N., Mayer A.E., Petrov Yu.V., Gruzdkov A.A. Maximum Yield Strength Under Quasi-Static and High-Speed Plastic Deformation of Metals. *Solid State Physics*, 2014, vol. 56, no. 12, pp. 2384–2393. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063783414120051>
6. Мелехов В.И., Соловьев И.И. Создание термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 87–91.  
Melekhov V.I., Solovyov I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 2, pp. 87–91. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b08/b087c4466253da22ed3e19c778437576.pdf>

7. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Тюрикова Т.В., Пономарева Н.Г. Повышение устойчивости дереворежущих пил термопластическим воздействием на распределение остаточных напряжений в полотне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 172–181.

Melekhov V.I., Solovyev I.I., Tyurikova T.V., Ponomareva N.G. Improving the Stability of Wood-Cutting Saws by Thermoplastic Action on the Distribution of Residual Stresses in The Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 172–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-172-181>

8. Патент 2434952 С1 РФ, МПК С21D 9/24, H05B 6/02. Устройство для создания термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы: № 2010117098/02: заявл. 29.04.2010; опубл. 27.11.2011 / И.И. Соловьев, В.И. Мелехов.

Melekhov V.I., Solovyev I.I. *Device for Creating Thermoplastic Stresses in Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2434952 C1, 2011. (In Russ.).

9. Патент 2684521 С1 РФ, МПК С21D 9/24. Устройство для создания термопластических нормированных напряжений в круглой пиле: № 2018121970: заявл. 15.06.2018; опубл. 09.04.2019 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев.

Melekhov V.I., Solovyev I.I. *Device for Creation Thermoplastic Normalized Stresses in Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2684521 C1, 2019. (In Russ.).

10. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения: моногр. М.: Наука, 1982. 109 с.

Pozdeyev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Residual Stresses: Theory and Applications: A Monograph*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 109 p. (In Russ.).

11. Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков: моногр. Архангельск, 2018. 157 с.

Prokofiev G.F. *Creation of High-Tech Sawmills: A Monograph*. Arkhangelsk, Solti Publ., 2018. 157 p. (In Russ.).

12. Стахив Ю.М. Устойчивость и колебания плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 296 с.

Stakhiyev Yu.M. *Stability and Vibration of Flat Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 296 p. (In Russ.).

13. Стахив Ю.М. Научно-технологические основы производства, подготовки и эксплуатации плоских круглых пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2002. 32 с.

Stakhiyev Yu.M. *Scientific and Technological Bases of Production, Setting-Up and Operation of Flat Circular Saws for Wood Sawing: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs.* Arkhangelsk, 2002. 32 p. (In Russ.).

14. Якунин Н.К. Подготовка круглых пил к работе. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 151 с.

Akunin N.K. *Setting-Up of Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 151 p. (In Russ.).

15. Bathe K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall Publ., 1982. 735 p.

16. Bayer R.J. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing, Revised and Expanded*. New York, CRC Press Publ., 2004. 416 p. <https://doi.org/10.1201/9780203021798>

17. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1983. 763 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>

18. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Elements Technology*. Vol. 1. Swansea, Pineridge Press Publ., 1986. 315 p.

19. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2009. 856 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article