

УДК 621.365.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

## ФОРМИРОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛОТНЕ КРУГЛОЙ ПИЛЫ

**В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012).

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

**И.И. Соловьев, канд. техн. наук;** *ResearcherID:* [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073).

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

**Н.Г. Пономарева, канд. техн. наук;** *ResearcherID:* [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631).

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 18.04.21 / Принята к печати 26.08.21

---

**Аннотация.** Рабочим инструментом круглопильных станков является круглая пила. Ее состояние во многом определяет качество обработки материала. Полотно круглой пилы в процессе резания подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов. Они вызывают удлинение и деформацию пильного полотна, возникновение внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Возможность пил противодействовать этим факторам определяется жесткостью и устойчивостью пильного полотна. Полотно круглой пилы принято условно делить на три зоны: периферийную, среднюю и центральную. Наибольшее влияние на устойчивость оказывает средняя часть диска. Первоначально пильный диск имеет плоскую форму равновесия, которое может быть нарушено любым внешним воздействием на пилу в процессе резания. Нарушение равновесия становится причиной отклонения полотна и режущей кромки пилы от исходного рабочего состояния и снижения точности и качества обработки древесины. Для предотвращения влияния внешних сил у круглой пилы в средней части полотна формируют коаксиальные зоны пластической деформации определенной ширины. При этом под действием созданных напряжений появляется эффект натяжения полотна. Применяют два способа формирования таких зон: проковку и вальцевание. Создание нормированных напряжений в пильном диске круглой пилы осуществляют локальным контактным воздействием рабочего органа пиллоправного инструмента на стальной диск пилы в определенных местах средней зоны. В обработанных кольцевых зонах формируют напряжения сжатия, компенсирующие силы центробежного ускорения, температурный нагрев отдельных зон полотна пилы, внешние продольные и поперечные изгибающие силы, возникающие в полотне при обработке древесины. Способы создания кольцевых зон полей пластической деформации, предусматривающие механическое воздействие на полотно пилы, имеют существенные недостатки. Для их устранения необходимы принципиально новые технические решения. Предложено формировать коаксиальные поля остаточных напряжений диска пилы термоматрическим воздействием, заключающимся в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне концентрированным тепловым воздействием по всей толщине полотна на локальные коаксиально расположенные по нему кольцевые зоны. Смоделирован процесс формирования коаксиальных кольцевых полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы. Рассмотренный способ подготовки пилы позволит повысить ее устойчивость в процессе работы.

*Для цитирования:* Мелехов В.И., Соловьев И.И., Пономарева Н.Г. Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 170–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

*Ключевые слова:* термопластические напряжения, круглая пила, устойчивость пилы, высокоскоростной нагрев, кольцевая зона.

## FORMATION OF COAXIAL FIELDS OF RESIDUAL STRESSES IN THE 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. Solovev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073).*

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

*Nataliya G. Ponomareva, Candidate of Engineering; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

---

**Original article** / Received on April 18, 2021 / Accepted on August 26, 2021

---

**Abstract.** The working tool of machines with circular cutting units is a circular saw, the condition of which largely determines the quality of material processing. Circular saw blades in the process of operation are subjected to a complex effect of force and temperature factors that cause elongation and deformation of the saw blade, and the occurrence of internal stresses that take it out of the flat form of elastic balance and reduce the tool's performance. The ability of saws to resist these factors is determined by the rigidity and stability of the saw blade. It is customary to consider a circular saw blade consisting of three zones: peripheral, middle and central. The middle part has the greatest influence on the stability of the saw blade. Initially, after manufacturing, the saw blade has a flat shape of balance, which can be disturbed by any external impact on the saw during the cutting process. The balance disturbance causes the blade and the cutting edge of the saw to deviate from the initial operating condition and reduce the accuracy and quality of wood processing. In order to prevent the influence of external forces, coaxial zones of plastic deformation of a certain width are formed in the middle part of the blade. In this case, under the influence of the created stresses, the effect of web tension appears. In world practice, two methods of forming such zones are used: forging and rolling. The creation of normalized stresses in the circular saw blade is carried out by local mechanical contact action of the working body of the saw tool on the steel saw blade in certain places of the middle zone. Compressive stresses compensating the forces of centrifugal acceleration, the thermal heating of individual zones of the saw blade, the external longitudinal and transverse bending forces that occur in the blade during wood processing are formed in the treated annular zones. The considered methods for creating annular zones of plastic deformation fields involving mechanical action on the saw blade have significant drawbacks, the elimination of which requires fundamentally new technical solutions. It is proposed to form coaxial fields of residual stresses of the saw blade by thermoplastic action consisting in creation of normalized residual stresses in the saw blade by concentrated thermal action on local annular zones coaxially located along the saw blade for the entire thickness of the saw. The formation of coaxial circular fields of residual stresses in the circular saw blade is simulated. The considered method of saw preparation will increase its stability in the process of operation.

**For citation:** Melekhov V.I., Solovev I.I., Ponomareva N.G. Formation of Coaxial Fields of Residual Stresses in the Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 170–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

**Keywords:** thermoplastic stresses, circular saw, saw stability, high-speed heating, annular zone.

### Введение

Круглопильные станки составляют основную часть оборудования деревообрабатывающего предприятия. Рабочим органом таких станков является круглая пила, состояние которой во многом определяет качество обработки материала.

Полотно круглой пилы, изготовленное из инструментальной стали, в процессе работы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов [2–5, 15–19, 21]. Они вызывают удлинение и деформацию пильного полотна, обуславливают возникновение внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Способность пил противодействовать этим силовым воздействиям определяется жесткостью и устойчивостью полотна. Устойчивость характеризует потенциальную возможность полотна пилы сопротивляться силам, воздействующим на него в плоскости наибольшей жесткости [13].

Пила выполнена в виде тонкого стального диска с центральным отверстием и зубчатой кромкой. Принято рассматривать полотно круглой пилы как подразделяющееся на три зоны: периферийную, среднюю и центральную [15, 16, 18]. Центральная зона приходится на область зажимных шайб, поэтому практически не влияет на устойчивость диска, не участвует в балансе распределения напряжений и принимается как абсолютно жесткая. Наибольшее влияние на устойчивость оказывает средняя часть. Первоначально диск имеет плоскую форму равновесия, которое может быть нарушено любым внешним воздействием на пилу в процессе резания. Нарушение равновесия вызывает отклонение полотна и режущей кромки пилы от исходного рабочего состояния, снижает точность и качество обработки древесины. Для сохранения работоспособности круглой пилы в средней части полотна формируют коаксиальные зоны пластической деформации определенной ширины. При этом под воздействием созданных напряжений проявляется эффект натяжения полотна.

В мировой практике существуют два способа формирования таких зон: проковка и вальцевание. В обработанных кольцевых зонах создают напряжения сжатия, компенсирующие силы центробежного ускорения, температурный нагрев отдельных зон полотна пилы, внешние продольные и поперечные изгибающие силы, возникающие в полотне при обработке древесины. На практике создание нормированных напряжений в пильном диске круглой пилы традиционно осуществляют локальным контактным воздействием рабочего органа пилоравного инструмента на стальной диск пилы в определенных местах средней зоны.

При кольцевой проковке обрабатывают среднюю зону полотна пилы бойком молотка. Пластическая деформация полотна происходит в прокованных кольцах определенной ширины, что обеспечивает натяжение полотна. Внешний радиус кольцевой зоны обработки принимают  $(0,7 - 0,8) R_1$ , где  $R_1$  – радиус пилы без зубьев. Такой способ подготовки полотна пилы носит субъективный

характер, не всегда обеспечивает нормированные напряжения в точечных зонах проковки и требует высокой квалификации оператора.

При вальцевании обработка диска пилы проводится роликами непрерывно по концентрическим кольцевым зонам. При этом в обработанных кольцах за счет механической деформации металла в плоскости пильного диска возникают зоны пластической деформации материала, обеспечивающие натяжение полотна, как и при проковке.

По сравнению с кольцевой проковкой вальцевание характеризуется высокой степенью осевой симметрии натяжения полотна пилы. При этом плоскостность пилы в процессе работы сохраняется, а регулирование давления роликов позволяет выравнивать натяжение пильного диска по секторам. Однако следует отметить, что вальцевание сопровождается «изламыванием» металла по вальцовочному следу, что снижает механическую прочность полотна на изгиб.

Глубина следа проковки на поверхности полотна от ударов бойка инструмента составляет до 0,05 мм (ГОСТ 980–69), при вальцевании – до 0,1 мм, т. е. напряжения растяжения в точечных зонах при механическом воздействии возникают только в поверхностном слое, не распространяясь по толщине диска пилы и не формируя равномерного поля напряжений по толщине полотна [15, 16, 18, 22].

Оба рассмотренных способа создания кольцевых зон полей пластической деформации предусматривают механическое воздействие на полотно пилы, обуславливающее негативные последствия, отмеченные выше. Для их предотвращения необходимы принципиально новые технические решения. Одним из направлений формирования нормированных полей напряжений в полотне пилы может быть локальный нагрев кольцевых зон.

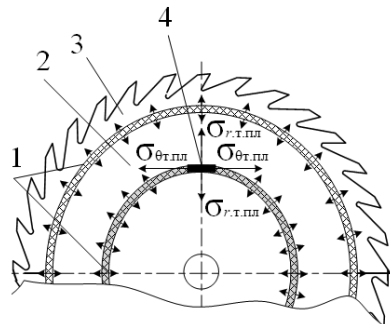
Следует отметить, что вопрос формирования полей остаточных термопластических напряжений по кольцевому следу практически не изучен. В связи с этим цель нашей работы – провести целенаправленные исследования данного вопроса для обоснования разработки практических рекомендаций по подготовке круглых пил термопластическим воздействием.

#### Объекты и методы исследования

Предложено формировать коаксиальные поля остаточных напряжений диска пилы теплофизическим воздействием [7–11, 14], заключающимся в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне концентрированным тепловым воздействием на локальные коаксиально расположенные по всей толщине полотна пилы кольцевые зоны (рис. 1). Предполагается контроль процесса в режиме реального времени.

Рис. 1. Круглая пила с кольцевыми зонами нагрева: 1 – коаксиально расположенные кольцевые зоны нагрева; 2 – диск пилы; 3 – зубчатая кромка; 4 – кольцевая зона нагрева

Fig. 1. Circular saw with annular heating zones: 1 – coaxially arranged annular heating zones; 2 – saw blade; 3 – toothed edge; 4 – annular heating zone



Рассматриваемый термопластический способ создания нормированных напряжений в диске пилы основан на высокоскоростном нагреве локальных кольцевых зон по всей толщине полотна пилы и получении позонно расположенных по диску пилы полей температурных напряжений, превышающих предел текучести металла и приводящих к появлению вторичных термопластических остаточных деформаций [8]. Это формирует в полотне пилы поля остаточных напряжений, позволяющие обеспечить устойчивое состояние пилы в процессе работы.

Создана математическая модель процесса формирования и количественной оценки остаточных напряжений после термопластического деформирования материала при нагреве локальной зоны на всю толщину полотна пилы [20].

Смоделирован процесс формирования коаксиальных кольцевых полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы диаметром 500 мм и толщиной 2,5 мм. Материал пилы – сталь 9ХФ со следующими характеристиками [6]: модуль упругости (Юнга)  $E = 196,1$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,27$ ; предел текучести  $\sigma_{0,2}$  определяется по графику зависимости предела текучести стали от температуры, МПа; среднее значение коэффициента линейного расширения  $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . Температура нагрева локальных кольцевых зон полотна пилы  $t = 300$  °С.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Остаточные термопластические напряжения в полотне пилы формируются первоначальными температурными деформациями [2–5], возникающими при равномерном нагреве локального кольцевого элемента на всю толщину полотна с последующим охлаждением.

При нагреве локального участка до температуры  $t$  в нем возникают температурные напряжения [1]

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

При  $t = 300$  °С температурные напряжения, равные 647 МПа, превышают предел текучести стали 9ХФ,  $\sigma_{0,2;300} \approx 320$  МПа. Пластичность снижает остаточные термопластические напряжения  $\sigma_{\text{т.пл}}$  [1, 12]. При температуре 300 °С не учитываем упрочнение материала полотна пилы в зоне нагрева. Тогда остаточные термопластические напряжения, возникшие в локальной кольцевой зоне по всей толщине полотна пилы после охлаждения,  $\sigma_{\text{т.пл}} \approx \sigma_{0,2;300} \approx 320$  МПа.

В процессе пиления древесины периферийная зона диска пилы нагревается больше центральной. Возникающий температурный градиент по радиусу диска и соответствующие ему температурные напряжения приводят к потере устойчивости и плоской формы равновесия диска [15, 17]. Температурные напряжения определяются температурным градиентом  $\Delta T$  и законом распределения температуры по радиусу диска (рис. 2).

Распределение температурных напряжений в полотне круглой пилы в тангенциальном  $\sigma_{\theta T}$  и радиальном  $\sigma_{rT}$  направлениях [16]:

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

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

где  $\Delta T$  – температурный градиент;  $\alpha_n$  – коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости (Юнга);  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  – функции, определяемые показателем степени  $n_1$  в законе распределения температур [16], отношением диаметра фланца  $d_\phi$  к диаметру диска пилы и отношением температур центральной и периферийной зон диска;  $r$  – текущий (рассматриваемый) радиус;  $R$  – радиус диска пилы.

Рис. 2. Температурные напряжения в диске пилы: 1 – диск пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – центральное отверстие; 4 – рассматриваемая кольцевая зона диска; 5 – элемент кольцевой зоны

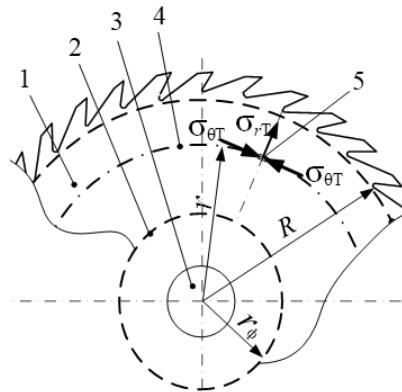


Fig. 2. Temperature stresses in the saw blade: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – central hole; 4 – disc annular zone under consideration; 5 – annular zone element

При выполнении расчетов принято  $n_1 = 5, d_\phi = 100$  мм,  $\Delta T = 30$  °С, тогда  $\eta_1 = 0,042; \eta_2 = -0,179; \eta_3 = -5,705 \cdot 10^{-3}; \eta_4 = 0,143$ .

Радиальные температурные напряжения по всему радиусу диска положительные [15], поэтому наибольшее значение с точки зрения устойчивости круглой пилы представляют тангенциальные составляющие температурных напряжений.

Расчет распределения тангенциальных составляющих температурных и термопластических напряжений по радиусу диска круглой пилы выполнен с использованием программного комплекса Mathcad. Графики распределения напряжений по диску пилы приведены на рис. 3.

Рис. 3. Распределение температурных и термопластических напряжений по радиусу диска круглой пилы

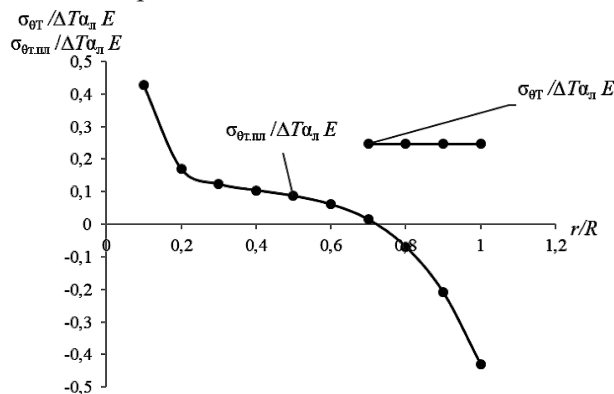


Fig. 3. Distribution of thermal and thermoplastic stresses along the radius of the circular saw blade

Из графика видно, что неравномерный нагрев по радиусу диска обуславливает тангенциальные напряжения растяжения в центральной и сжатия – в периферийных зонах диска. Наличие в периферийной зоне сжимающих температурных напряжений приводит к ослаблению зубчатой кромки, потере

плоскостности и устойчивости полотна пилы. Точка перехода тангенциальных напряжений растяжения в напряжения сжатия находится на относительном радиусе диска  $r$ , равном  $0,75R$ , и определяет границу раздела между средней и периферийной зонами диска. Этот радиус соответствует радиусу окружности, принятому при вальцевании по одной окружности [16]. Зона термопластического воздействия располагается непосредственно в периферийной зоне диска. Это воздействие вызывает в ней растягивающие тангенциальные термопластические напряжения, компенсирующие сжимающие температурные напряжения. Величина термопластических напряжений зависит от температуры нагрева и ширины нагреваемой кольцевой зоны.

#### Заключение

Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы термопластическим воздействием является новым подходом и позволяет кардинально изменить подготовку круглой пилы к работе с обеспечением устойчивости пильного диска в процессе резания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с. Birger I.A. *Residual Stresses*. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
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.
3. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 95–101. Bogatov A.A. Residual Stresses and Metal Destruction. *Proceedings of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering"*. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2013, pp. 95–101.
4. Боровиков Е.М., Орлов Б.Ф. Термический способ подготовки круглых пил к работе // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 6. С. 90–96. Borovikov E.M., Orlov B.F. Thermal Method of Preparing Circular Saws for Operation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1974, no. 6, pp. 90–96. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1974/B.pdf>
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. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2014, vol. 56, iss. 12, pp. 2384–2393. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414120051>
6. ГОСТ 5950–2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия: дата введения 2002-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 35 с. *State Standard GOST 5950–2000. Tool Alloy Steel Bars, Strips and Coils. General Specifications*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2003. 35 p.
7. Мелехов В.И., Соловьев И.И. Создание термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 87–90. Melekhov V.I., Soloviev I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2010, no. 2, pp. 87–90. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b08/b087c4466253da22ed3e19c778437576.pdf>

8. 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., Solov'ev 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. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-172-181>
9. Патент 2434952 РФ. Устройство для создания термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы: № 2010117098: заявл. 29.04.2010: опубл. 27.11.2011 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Solov'ev I.I., Melekhov V.I. *Device to Develop Thermoplastic Stresses in Saw Blade of Ring Saw*. Patent RF no. RU 2434952 C1, 2011.
10. Патент 2614863 РФ. Устройство для создания термопластических напряжений в полосовых пилах: № 2015141255: заявл. 28.09.2015: опубл. 29.03.2017 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Melekhov V.I., Solov'ev I.I. *Device for Creation of Thermoplastic Concentrated Stresses in Strip Saws*. Patent RF no. RU 2614863 C1, 2017.
11. Патент 2663029 РФ. Способ термопластического натяжения пильного диска круглой пилы: № 2017121665: заявл. 21.06.2017: опубл. 01.08.2018 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Solov'ev I.I., Melekhov V.I. *Method of Thermoplastic Tensioning of the Round Saw Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2663029 C1, 2018.
12. 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*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 109 p.
13. Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков: моногр. Архангельск, 2018. 157 с. Prokof'ev G.F. *Creation of High-Tech Sawmills*. Arkhangelsk, 2018. 157 p.
14. Соловьев И.И. Совершенствование термопластической технологии подготовки круглых пил: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 18 с. Solov'ev I.I. *Improvement of Thermoplastic Technology for Preparing Circular Saws*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2012. 18 p.
15. Стахийев Ю.М. Устойчивость и колебания плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 296 с. Stakhiyev Yu.M. *Stability and Vibrations of Flat Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 296 p.
16. Стахийев 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, Preparation and Operation of Flat Round Saws for Wood Sawing*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2002. 32 p.
17. Якунин Н.К. Подготовка круглых пил к работе. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 153 с. Yakunin N.K. *Preparation of Circular Saws for Operation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 153 p.
18. Bayer R.J. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York, CRC Press, 2004. 416 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203021798>
19. Bathe K.-J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1982. 735 p.
20. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. 763 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>
21. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Elements Technology*. Swansea, Pineridge Press, 1986, vol. 1. 315 p.
22. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, 2009. 856 p.