

Научная статья

УДК 621.365.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-175-183

## Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно

**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, доц.;* *ResearcherID:* [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073),

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

**Е.В. Сазанова, канд. экон. наук, доц.;** *ResearcherID:* [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>

**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; v.melekhov@narfu.ru, i.solovnev@narfu.ru , e.sazanova@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

Поступила в редакцию 24.02.24 / Одобрена после рецензирования 16.05.24 / Принята к печати 19.05.24

**Аннотация.** Работоспособность ленточной пилы в значительной степени определяется ее устойчивостью и долговечностью – возможностью длительно сохранять эксплуатационные свойства под влиянием внешних и внутренних факторов до наступления предельного состояния, заканчивающегося потерей устойчивости и разрушением полотна пилы. В процессе работы полотно ленточной пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов, которые изменяют ее напряженное состояние. Долговечность и устойчивость ленточной пилы зависят от величины и характера распределения суммарных напряжений в наиболее нагруженном поперечном сечении полотна. Итоговое напряжение на участке полотна, определяемое поперечным сечением, складывается из внутренних напряжений и напряжений от внешних сил: натяжения пилы, изгиба полотна на шкивах, действия центробежных сил, вальцевания полотна, нагрева полотна, наклона шкивов, сил резания, прочих неучтенных напряжений. Многочисленными исследованиями установлено, что разрушение ленточных пил носит усталостный характер, обусловливаемый в основном аккумуляцией напряжений в полотне пилы под воздействием постоянных сил натяжения полотна и переменного циклического напряжения изгиба полотна на шкивах. Одним из направлений повышения долговечности ленточной пилы является уменьшение амплитуды циклических напряжений изгиба в полотне созданием внутренних компенсирующих контрнаправленных напряжений. В результате приведенного в статье анализа способов создания внутренних компенсирующих напряжений в ленточной пиле механическим или длительным высокотемпературным воздействием на все полотно пилы отмечено, что такие подходы ограничивают долговечность инструмента, снижают твердость материала и стойкость режущей кромки зуба. Предложено формировать поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим воздействием, заключающимся в создании локальных полей остаточных напряжений в полотне пилы кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на массив чередующихся поперечно расположенных по полотну пилы миниполосовых участков.

© Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** ленточная пила, миниполосовой участок, индукционный нагрев, термопластические напряжения, долговечность, устойчивость

**Для цитирования:** Мелехов В.И., Соловьев И.И., Сазанова Е.В., Пономарева Н.Г. Повышение работоспособности ленточных пил локальным теплофизическим воздействием на полотно // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 6. С. 175–183. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-175-183>

Original article

## Improving the Performance of Band Saws by Local Thermophysical Effects on the 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*<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073),

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

*Ekaterina V. Sazanova*, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-8650-2019](https://orcid.org/0000-0001-5731-7517), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>

*Natalya 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; v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru<sup>✉</sup>, e.sazanova@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

Received on February 24, 2024 / Approved after reviewing on May 16, 2024 / Accepted on May 19, 2024

**Abstract.** The performance of a band saw is largely determined by stability and durability – the ability to maintain operational properties for a long time under the influence of external and internal factors until the onset of a limiting state, ending with loss of stability and destruction of the saw blade. During operation, the band saw blade is subject to the complex effects of force and temperature factors that change its stress state. The durability and stability of a band saw depends on the magnitude and nature of the distribution of total stresses in the most loaded cross-section of the blade. The final stress on the section of the blade, determined by the cross section, is the sum of internal stresses and external forces: saw tension, bending of the blade on the pulleys, centrifugal forces, blade rolling, blade heating, pulley tilt, cutting forces, and other unaccounted stresses. Numerous studies have established that the destruction of band saws is of a fatigue nature, caused mainly by the accumulation of stresses in the saw blade under the influence of constant blade tension forces and alternating cyclic bending stress of the blade on the pulleys. One of the ways to increase the durability of a band saw is to reduce the amplitude of cyclic bending stresses in the blade by creating internal compensating counter-directional stresses. As a result of the analysis given in the article of the methods for creating internal compensating stresses in a band saw by mechanical or long-term high temperature exposure to the entire saw blade, it has been noted that such approaches limit the durability of the tool, reduce the hardness of the material and the durability of the cutting edge of the saw tooth. It is proposed to form fields of internal residual compensating stresses in the band saw blade by thermophysical effect, which consists in creating local fields of residual stresses in the saw blade by a short-term (1–2 s) concentrated thermal action on an array of alternating mini-strip sections located transversely along the saw blade.



**Keywords:** band saw, mini-strip section, induction heating, thermoplastic stresses, durability, stability

**For citation:** Melekhov V.I., Solovev I.I., Sazanova E.V., Ponomareva N.G. Improving the Performance of Band Saws by Local Thermophysical Effects on the Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 6, pp. 175–183. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-6-175-183>

### Введение

На ленточнопильных станках раскрой древесных сортиментов производят движущейся тонкой стальной бесконечной лентой с зубчатой кромкой, установленной на шкивах. Работоспособность ленточной пилы в значительной степени определяется ее устойчивостью и долговечностью – свойством инструмента длительно сохранять работоспособность под действием внешних и внутренних факторов до наступления предельного состояния, приводящего к потере устойчивости и разрушению полотна пилы.

При работе полотно ленточной пилы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов, изменяющих ее напряженное состояние. Долговечность и устойчивость ленточной пилы определяются величиной и характером распределения суммарных напряжений в наиболее нагруженном поперечном сечении полотна. Итоговое напряжение на этом участке полотна складывается из внутренних напряжений и напряжений от внешних сил: натяжения пилы, изгиба полотна на шкивах, действия центробежных сил, вальцевания полотна, нагрева полотна, наклона шкивов, сил резания, прочих неучтенных напряжений [5, 14].

Проведенными ранее исследованиями установлено, что разрушение ленточных пил носит усталостный характер, определяемый в основном аккумуляцией напряжений в полотне пилы под воздействием постоянных сил натяжения полотна и переменного циклического напряжения изгиба полотна на шкивах. Величина постоянных и циклических напряжений в зависимости от размеров сечения полотна, качества изготовления и подготовки пилы может изменяться в пределах 50–100 и 180–300 МПа соответственно и в целом составляет 60–75 % от общих напряжений, возникающих в полотне пилы [5, 6, 8, 14].

Суммарная величина напряжений в полотне пилы не должна превышать предел усталостной прочности материала полотна, который при коэффициенте запаса прочности  $k = 2$  составляет 360–500 МПа [1–4].

Циклические напряжения изгиба в полотне определяются из соотношения [14]

$$\sigma_{\text{изг}} = E \frac{s}{D + s},$$

где  $E$  – модуль упругости;  $s$  – толщина пилы;  $D$  – диаметр шкивов.

Уменьшение циклических напряжений изгиба в полотне может быть достигнуто увеличением диаметра шкивов  $D$ , уменьшением толщины полотна пилы  $s$  или применением сталей с улучшенными характеристиками, что позволяет повысить долговечность пилы [11].

Рост диаметра шкивов увеличивает металлоемкость и габариты оборудования. При уменьшении толщины пилы  $s$  снижается жесткость и устойчивость инструмента.

Г.Ф. Прокофьев и И.И. Иванкин [13] разработали конструкцию станка с пилой, движущейся по криволинейным бесконтактным аэростатическим направляющим с большим радиусом кривизны, что позволило значительно снизить напряжения изгиба в полотне.

Одним из направлений повышения долговечности ленточной пилы является уменьшение амплитуды циклических напряжений изгиба в полотне созданием внутренних компенсирующих контрнаправленных напряжений. А.Ф. Дулевич и др. [7] предложили метод создания таких напряжений в наружных слоях ленточной пилы за счет предварительного упругопластического деформирования полотна. Ленточная пила обкатывается роликами на шкивах с меньшим, чем у рабочего шкива, диаметром с созданием механических напряжений от изгиба во внешних слоях полотна, превышающих предел текучести материала, и образованием остаточных напряжений сжатия. Полотно пилы принимает определенный меньшим шкивом радиус кривизны, и при установке пилы на рабочие шкивы станка остаточные напряжения сжатия в поверхностных слоях полотна компенсируют напряжения изгиба в полотне, снижая результирующие напряжения и способствуя повышению долговечности пилы. Одновременно следует учитывать, что механическое контактное воздействие на полотно пилы роликами с пластической деформацией металла может вызвать механическое повреждение полотна и ограничить долговечность инструмента.

В.Ф. Фонкин и В.В. Герасимов [15] предложили проводить подготовку пыльных лент методом термической обработки полотен в предварительно упруго деформированном состоянии, исследовали пластическое деформирование (искривление) полотен ленточных пил в диапазонах температур и времени 500–600 °С и 5–20 мин соответственно. При установке ленточной пилы на шкивы полученные после обработки внутренние напряжения позволяют снизить амплитуду циклических напряжений изгиба, что приводит к повышению выносимости ленточных пил и способствует увеличению их долговечности.

Авторами статьи предложено формировать поля внутренних остаточных компенсирующих напряжений в полотне ленточной пилы теплофизическим методом [9], заключающимся в создании локальных полей остаточных напряжений в полотне пилы кратковременным (1–2 с) концентрированным тепловым воздействием на поперечно расположенные по полотну пилы миниполосовые участки. Это обеспечивает равномерное распределение компенсирующих напряжений в материале инструмента по всему массиву миниполосового участка, однородность структуры полей напряжений.

Цель – обоснование предлагаемого метода повышения работоспособности ленточной пилы.

#### *Объекты и методы исследования*

При подготовке пилы (рис. 1) полотно условно поделено на звенья  $l$  длиной  $b$  миниполосовыми участками 2, соединяющими зубчатую 3 и заднюю 4 кромки пилы. Такая звеньевая разбивка может быть условно сопоставлена с моделью шарнирно-цепной или ременной передачи. При сопоставлении с шарнирно-цепной передачей полученные после термообработки внутренние напряжения на границе между звеньями и миниполосовыми участками при установке ленточной пилы на шкивы (рис. 2) выполняют роль условных нано-

подвижных шарниров, обеспечивающих поворот звена на шкивах на угол  $\alpha$  изгиба полотна, определяемого диаметром шкива  $R$ , а при сравнении с ременной передачей – роль дискретного взаимодействия между элементарными поперечными полосовыми участками ремня.

Рис. 1. Участок полотна ленточной пилы  
Fig. 1. The section of a band saw blade

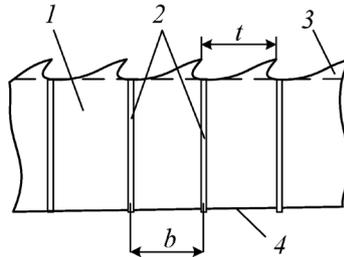
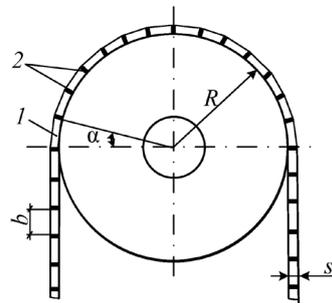
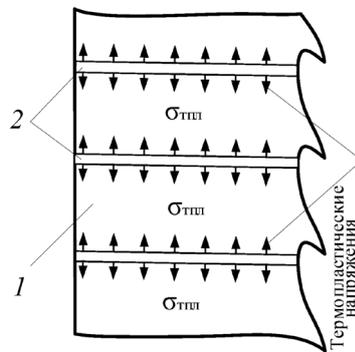


Рис. 2. Полотно ленточной пилы на шкиве  
Fig. 2. The band saw blade on a pulley



Технология подготовки ленточной пилы к работе основывается на тепловом способе [1, 5, 16] создания внутренних компенсирующих напряжений в полотне пилы мощным импульсным кратковременным индукционным прогревом по всему сечению и объему поперечно расположенных миниполосовых участков. При локальном нагревании массива миниполосового участка на его границе со звеном полотна образуются нормальные разнонаправленные тепловые напряжения  $\sigma_{\text{теп}}$ , превышающие предел текучести материала  $\sigma_{0,2}$  полотна. При этом в массиве миниполосового участка возникают вторичные термопластические остаточные деформации [1–4, 9, 12, 16–21], которые обеспечивают формирование на границе миниполосового участка 2 со звеном 1 полотна пилы внутренних остаточных термопластических напряжений  $\sigma_{\text{тпл}}$ , позволяющих частично компенсировать напряжения изгиба в полотне и увеличить ее долговечность (рис. 3).

Рис. 3. Участок полотна ленточной пилы со следами термопластической обработки  
Fig. 3. The band saw blade section with traces of thermoplastic processing



Количественная оценка компенсирующих остаточных термопластических напряжений при импульсном индукционном прогреве массива миниполосового участка полотна пилы выполнена по математической модели [10].

Смоделирован процесс формирования остаточных термопластических напряжений в полотне ленточной пилы. Материал полотна пилы – сталь инструментальная легированная 90ХФ с механическими характеристиками по ГОСТ 5950–2000: модуль упругости  $E = 196,1$  ГПа; средний коэффициент линейного расширения  $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ ; предел текучести  $\sigma_{0,2}$  определяется по зависимости предела текучести стали от температуры, МПа.

Тепловая обработка поперечных миниполосовых участков и создание компенсирующих напряжений в граничной зоне смежных участков полотна пилы производится локальным индукционным нагревом.

При этом на границе миниполосового участка со звеном при нагреве его массива до 250–600  $^\circ\text{C}$  и последующем быстром охлаждении возникают нормальные направленные к граничной зоне смежных участков остаточные термопластические напряжения. При быстром охлаждении миниполосового участка твердость металла не меняется.

В массиве миниполосового участка, нагретого до температуры  $t$ , образуются тепловые напряжения [17]

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

#### Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости тепловых напряжений  $\sigma_t(t)$  и предела текучести  $\sigma_{0,2}(t)$  сталей 90ХФ приведены на рис. 4.

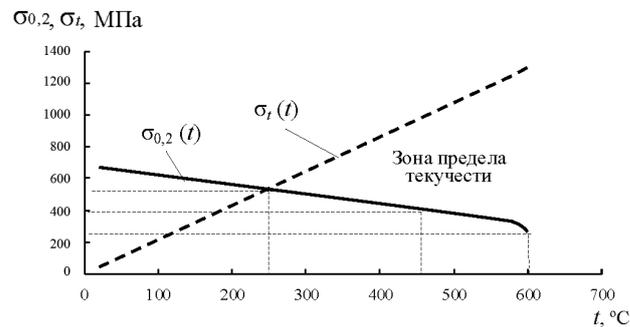


Рис. 4. Тепловые напряжения и предел текучести сталей 90ХФ в зависимости от температуры

Fig. 4. The thermal stresses and yield strength of 90KhF steels depending on temperature

Из анализа зависимостей следует, что при  $t = 250$   $^\circ\text{C}$  и выше (зона предела текучести на рис. 4) тепловые напряжения  $\sigma_t$  превышают предел текучести  $\sigma_{0,2}$  для стали 90ХФ, что способствует формированию компенсирующих остаточных термопластических напряжений.

Характер распределения напряжений изгиба  $\sigma_{изг}$  и компенсирующих остаточных термопластических напряжений  $\sigma_{тпл}$  в граничной зоне термообработанного миниполосового участка в подготовленном полотне пилы, установленном на шкивах станка, приведен на рис. 5.

Результирующие напряжения в полотне пилы определяются по формуле

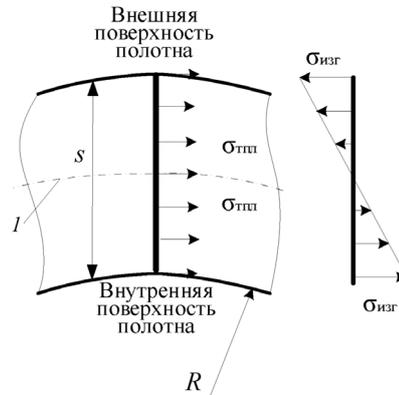
$$\sigma_{рез} = \sigma_{изг} - \sigma_{тпл},$$

где  $\sigma_{изг}$  – напряжения изгиба в полотне пилы, МПа;  $\sigma_{тпл}$  – компенсирующие термопластические напряжения, МПа.

Циклические напряжения изгиба  $\sigma_{изг}$  симметрично распределены относительно оси сечения полотна пилы (рис. 6, а) и изменяются в пределах 180–300 МПа в зависимости от толщины полотна и диаметра шкивов станка.

Рис. 5. Распределение напряжений изгиба и компенсирующих остаточных термопластических напряжений в граничной зоне термообработанного миниполосового участка:  $l$  – ось сечения полотна пилы

Fig. 5. The distribution of bending stresses and compensating residual thermoplastic stresses in the boundary zone of the heat-treated mini-strip section:  $l$  – cross-sectional axis of the saw blade



Компенсирующие термопластические напряжения  $\sigma_{\text{тпл}}$  (рис. 6, б) при температурах нагрева 450–600 °С составляют 250–400 МПа (рис. 4).

Распределение результирующих напряжений  $\sigma_{\text{рез}}$  относительно оси сечения полотна в подготовленной пиле, установленной на шкивах станка, при  $\sigma_{\text{изг}} = 3000$  МПа,  $\sigma_{\text{тпл}} = 250$  МПа показано на рис. 6, в.

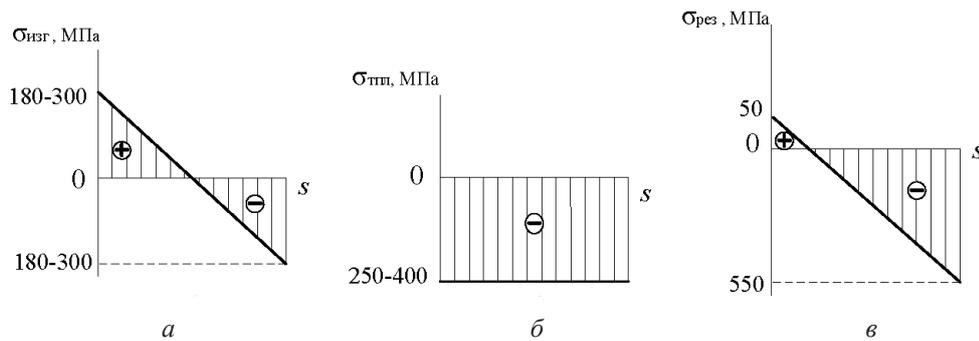


Рис. 6. Распределение напряжений в граничной зоне полосовых участков: а – симметричные напряжения изгиба; б – компенсирующие термопластические; в – результирующие

Fig. 6. The stress distribution in the boundary zone of the strip sections: а – symmetrical bending stresses; б – compensating thermoplastic; в – resultant

### Заключение

Таким образом, повышение работоспособности ленточных пил может быть достигнуто формированием компенсирующих термопластических напряжений в полотне путем концентрированного импульсного кратковременного индукционного нагрева массива чередующихся поперечно расположенных по полотну пилы миниполосовых участков.

### 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. (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, Ural State Technical university-Ural Polytechnic Institute Publ., 2002. 329 p. (In Russ.).

3. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа им. проф. А.Ф. Головина: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2013. С. 95–101.

Bogatov A.A. Residual Stresses and Metal Failure. *Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. Ural Scientific and Pedagogical School named after Prof. A.F. Golovin: Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference*. Yekaterinburg, Ural University 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 Method of Preparing Circular Saws for Work. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1974, no. 6, pp. 90–94. (In Russ.).

5. Грубе А.Э. Станки и инструменты по деревообработке. Т. II. Режущие инструменты по механической обработке древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 700 с.

Grube A.E. *Woodworking Machines and Tools*. Vol. II. Cutting Tools for Mechanical Conversion of Wood. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1949. 700 p. (In Russ.).

6. Дулевич А.Ф., Киселев С.В. Механизм разрушения ленточных пил // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2007. № 2. С. 283–286.

Dulevich A.F., Kiselev S.V. Mechanism of Destruction of Band Saws. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 2: Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forest and Woodworking Industry, 2007, no. 2, pp. 283–286. (In Russ.).

7. Дулевич А.Ф., Макаревич С.С., Киселев С.В. Способ повышения усталостной долговечности ленточных пил путем создания внутренних компенсирующих напряжений // Тр. Белорус. гос. технол. ун-та. Сер. 2: Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2009. № 2. С. 331–333.

Dulevich A.F., Makarevich S.S., Kiselev S.V. Method for Increasing the Fatigue Life of Band Saws by Creating Internal Compensating Stresses. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 2: Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2: Forest and Woodworking Industry, 2009, no. 2, pp. 331–333. (In Russ.).

8. Кондратюк А.А., Шилько В.К. Оценка напряженного состояния ленточных пил // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2004. Т. 307, № 2. С. 138–142.

Kondratyuk A.A., Shil'ko V.K. Assessment of the Stress State of Band Saws. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 138–142. (In Russ.).

9. 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., Soloviev I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2010, no. 2, pp. 87–91. (In Russ.).

10. 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., Solovev 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>

11. *Настенко А.А.* Подготовка ленточных пил. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 152 с.  
Nastenko A.A. *Preparing Band Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 152 p. (In Russ.).
12. Патент 2614863 РФ, МПК C21D 9/24 (2006.01), C21D 1/10 (2006.01). 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., Solovyov I.I. *A Device for Creating Thermoplastic Stresses in Band Saws*. Patent RF no. 2614863, 2017. (In Russ.).
13. *Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И.* Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. / под ред. Г.Ф. Прокофьева. Архангельск: АГТУ, 2009. 379 с.  
Prokofiev G.F., Ivankin I.I. *Increasing the Efficiency of Wood Sawing on Frame Saws and Band Saws*: Monograph. Ed. by G.F. Prokofiev. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2009. 379 p. (In Russ.).
14. *Феоктистов А.Е.* Ленточнопильные станки. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 151 с.  
Feoktistov A.E. *Band Saw Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 151 p. (In Russ.).
15. *Фонкин В.Ф., Герасимов В.В.* Повышение долговечности и устойчивости дереворежущих ленточных пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 1984. № 6. С. 60–65.  
Fonkin V.F., Gerasimov V.V. Increasing the Durability and Stability of Wood-Cutting Band Saws. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1984, no. 6, pp. 60–65. (In Russ.).
16. *Якунин Н.К., Якунин И.Н.* Подготовка к работе и эксплуатация ленточных пил. М.: МГУЛ, 2005. 362 с.  
Yakunin N.K., Yakunin I.N. *Preparation for Work and Operation of Band Saws*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2005. 362 p. (In Russ.).
17. Bathe K.-J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1982. 736 p.
18. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. 812 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>
19. Holzweissig F., Meltzer G. *Meßtechnik der Maschinendynamik*. Leipzig, Fachbuchverlag, 1978. 418 p. (In Germ.).
20. Kuhnert E., Hunger P. Schwingungsstillung an Gattersägemaschinen. *Holzindustrie*, 1976, b. 2, pp. 58–60. (In Germ.).
21. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 882 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