

УДК 674.053:621.934/936  
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.104

## КОНТРОЛЬ ПЛОСКОСТНОСТИ КРУГЛЫХ ПИЛ

*А.Е. Алексеев, д-р техн. наук, проф.*

*А.П. Алабышев, инж.*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;  
e-mail: a.alekseev@narfu.ru

Для плоских изделий применяются бесконтактные и контактные методы контроля плоскостности. При проведении бесконтактного контроля используют оптические системы. Контактный контроль поверхности подразумевает применение механических систем измерения или специальных преобразователей физических величин материала. Контактные методы, основанные на исследовании физических параметров материала, позволяют контролировать потерю плоской формы равновесия объекта и изменение остаточных напряжений. Образующиеся остаточные напряжения имеют наибольшее значение в области периферии диска из-за повышенного нагрева данной зоны пилы. Отклонение от плоскостности диска вследствие потери им плоской формы равновесия носит несимметричный характер. Нами предлагается применять метод акустической тензометрии для контроля плоскостности плоских круглых пил. Суть метода акустической тензометрии заключается в изменении скорости распространения ультразвуковых колебаний в материале при изменении величины остаточных напряжений. Предлагаемый способ подразумевает разбиение диска на кольцевые зоны с их последующим сканированием в окружном направлении. Отклонения кольцевой зоны от плоскостности характеризуются наличием деформации в сканируемой зоне и сравниваются с нулевыми показателями не эксплуатируемой ранее пилы. Представленная в работе экспериментальная установка предназначена для контроля плоскостности круглых пил методом акустической тензометрии и прямого измерения с помощью индикатора часового типа. Дополнительно перед проведением эксперимента контролируемые пилы подвергались химическому анализу для подтверждения соответствия заявленной марки стали у всех пил. Для возбуждения ультразвуковых колебаний на контролируемом участке использовался пьезоэлектрический преобразователь DA-501 с рабочей частотой 5 МГц, измерения проводились эхо-методом. В результате предварительного опыта было установлено, что полученные экспериментальные данные имеют нормальное распределение. Проведение основного эксперимента опиралось на полный факторный план с тремя варьируемыми параметрами, на основании результатов которого была принята теоретическая зависимость и доказана возможность использования данного метода для контроля плоскостности круглых пил.

*Ключевые слова:* плоскостность, круглые пилы, акустическая тензометрия, ультразвуковые колебания, остаточные напряжения.

---

*Для цитирования:* Алексеев А.Е., А.П. Алабышев Контроль плоскостности круглых пил // Лесн. журн. 2017. № 6. С. 104–113. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.104

*Введение*

Отклонение от плоскостности – это наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка. Методы контроля плоскостности изделий разделяются на контактные и бесконтактные.

Исследованием остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления, эксплуатации, термической обработки, а также разработкой методов их контроля занимались следующие ученые: Н.Н. Давыденков, Г.Ф. Косолапов, Н.Г. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, Н.Н. Новиков, И.В. Кудрявцев, С.П. Буркин, И.А. Соколов, В.И. Уральский, Б.И. Гайдученко, И.А. Биргер, Н.П. Шапов, И.В. Ткачев, В. Бэкофен, М.Л. Берштейн [2–5, 7, 9–15], Стахийев Ю.М. [8]. Основными факторами, вызывающими возникновение остаточных напряжений в материале изделия, являются нагревание поверхностных слоев и пластическая деформация при силовом воздействии.

При контактном методе контроля плоскостности определяется перемещение измерительного наконечника (техническое решение задачи отображено в описаниях изобретений: № RU2168150C2, МПК G01B 5/28; № RU98122747A, МПК G01B 5/28; № RU2388997C2, МПК G01B 21/30; № RU2287776, МПК G01B 11/30) или измеряются физические параметры материала при контакте с поверхностью (см. описание изобретений: № RU2005135201A, МПК G01B 7/00; № RU2006786C1, МПК G01B 5/28; № RU2131111B, МПК G01B5 5/24, G01L 1/00, B27B33/08; № RU2400739C1, МПК G01N29/00; № RU2267371C2, МПК B21B 38/02).

При бесконтактном методе применяется оптическая профилометрия или интерферометрия (см. описание изобретений: № RU94036722A1, МПК G01B 11/30; № RU2545385C1, МПК G01B 15/02; № RU2189563C1 МПК, G01B 11/26; № SU980507A1, МПК G01B 9/02; № RU 2254556C2, МПК G01B 11/24, B21 B38/02; № RU2059194C МПК G01B9/02).

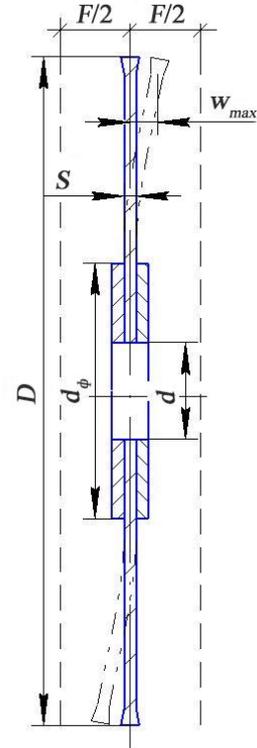
Наиболее информативны методы, позволяющие оценивать физические параметры материала, в том числе остаточные напряжения в нем. Для контроля остаточных напряжений применяются методы рентгеновской и акустической тензометрии, измерение анизотропии магнитных параметров, контроль вихревых токов.

Цель данной работы – изучить возможность применения метода акустической тензометрии для контроля плоскостности круглых плоских пил.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Отклонение диска круглой пилы от плоскостности является следствием критического перепада температур вдоль ее радиуса. На рис. 1 показаны стационарное положение диска пилы и отклонение ее положения от плоскостности.

Рис. 1. Отклонение от плоскостности диска круглой пилы:  $F$  – поле допуска на отклонение от плоскостности;  $w_{max}$  – изгиб пилы;  $S$  – толщина пилы;  $D$  – диаметр пилы;  $d$  – диаметр посадочного отверстия;  $d_{\phi}$  – диаметр фланцев



Поле допуска отклонения от плоскостности определяют исходя из размеров и свойств распиливаемого материала. Таким образом, допустимое отклонение от плоскостности круглых пил принимают равным максимальному отклонению  $w_{max}$  геометрических размеров распиливаемого материала.

Для контроля отклонения диска круглой пилы предлагается использовать метод акустической тензометрии, который заключается в измерении скорости распространения ультразвуковых колебаний под действием механических напряжений. Зависимость скорости распространения ультразвуковых колебаний от первого и второго для главных механических напряжений описывается системой уравнений [6]:

$$\begin{cases} \sigma_1 = A \frac{v_{lx} - v_{l0}}{v_{l0}}; \\ \sigma_2 = B \frac{v_{lx} - v_{l0}}{v_{l0}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A, B$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;

$v_{lx}, v_{l0}$  – скорость распространения ультразвуковых колебаний при остаточных и нулевых напряжениях.

Вследствие наличия остаточных деформаций периферия диска отклоняется от состояния плоской формы равновесия. Схема разбиения круглой пилы на кольцевые зоны приведена на рис. 2.

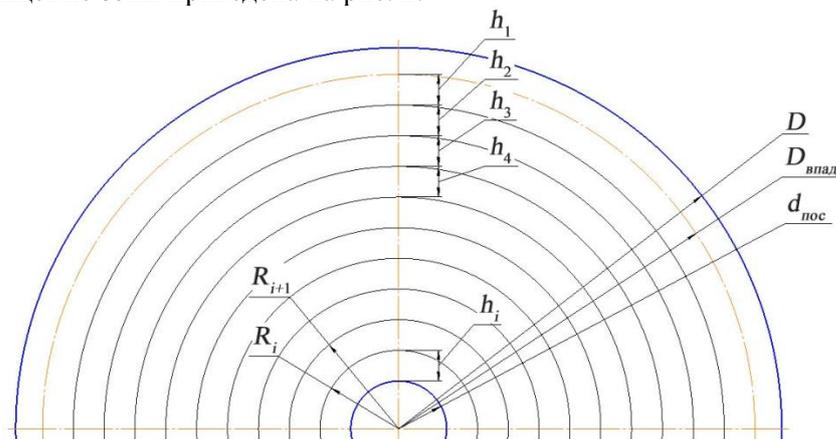


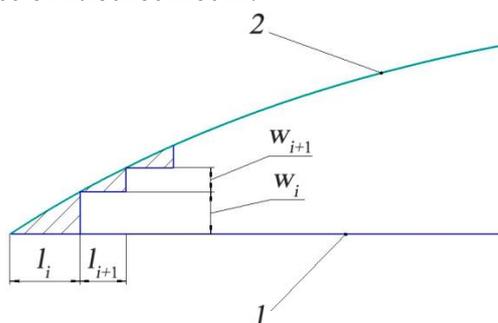
Рис. 2. Схема контролируемой поверхности:  $R_i$  – радиус  $i$ -й окружности;  $R_{i+1}$  – радиус  $(i+1)$ -й окружности;  $h_i$  – ширина кольцевой зоны;  $D_{\text{впад}}$  – диаметр окружности впадины зубьев пилы;  $d_{\text{пос}}$  – диаметр посадочной окружности

При условии, что каждая кольцевая зона не имеет деформаций, приводящих к отклонению поверхности от плоскостности, площадь кольцевой зоны определим по следующей формуле:

$$S_{\text{к.з}} = \pi(R_{i+1} - R_i)^2 \quad (2)$$

При деформации диска площадь кольцевой зоны будет изменяться за счет остаточных деформаций, при этом площадь кольцевого сектора составит  $S \pm \Delta S$  (где  $\Delta S$  – приращение площади кольцевого сектора;  $\pm$  – характеризует состояние растяжения (+) или сжатия (-)). В дальнейшем будем использовать допущение, что сумма площадей кольцевой зоны будет определяться как сумма площадей кольцевых секторов как в состоянии плоской формы равновесия, так и при наличии отклонения ее от плоскостности.

Рис. 3. Развертка кольцевой зоны: 1 – кольцевая зона при отсутствии отклонения от плоскостности; 2 – кольцевая зона при ее деформации;  $l_i$  – длина контролируемой  $i$ -й зоны;  $l_{i+1}$  – длина контролируемой  $(i+1)$ -й зоны;  $w_i$  – отклонение от плоскостности  $i$ -й контролируемой зоны;  $w_{i+1}$  – отклонение от плоскостности  $(i+1)$ -й контролируемой зоны



Из приведенной на рис. 3 развертки кольцевой зоны видно, что высота волнистости (высота каждого участка) развертки будет равна корню квадратному из суммы квадратов длины развертки кольцевого сектора ( $l_i$ , мм) и длины деформированной части развертки ( $l_{i \text{ деф}}$ , мм). Принимая допущение, что полный изгиб кольцевой зоны диска определяется как сумма высот изгибов его круговых секторов, окончательно данный параметр

$$w = \sum_{i=1}^n \sqrt{l_i^2 + l_{i \text{ деф}}^2}. \quad (3)$$

Длина деформированной части развертки ( $l_{i \text{ деф}}$ ) рассчитывается как сумма длины недеформированной части  $l_i$  и произведения длины недеформированной части  $l_i$  на ее деформацию  $\varepsilon_\varphi$  (изменение размеров рассматриваемой части ввиду наличия в ней напряжений) в окружном направлении:

$$w = \sum_{i=1}^n \sqrt{l_i^2 + (l_i \pm l_i \varepsilon_\varphi)^2}. \quad (4)$$

Система уравнений, приведенная ниже, описывает изменение деформаций в радиальном и окружном направлениях в зависимости от наличия остаточных напряжений [1]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_r + \mu \varepsilon_\varphi); \\ \sigma_\varphi = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_\varphi + \mu \varepsilon_r), \end{cases} \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$  – деформация в радиальном и окружном направлениях.

Выражаем из первого уравнения системы (5) деформацию в радиальном направлении. Полученное выражение подставляем во второе уравнение системы (5), затем значение деформации в окружном направлении подставляем в первое уравнение системы и получаем

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} \left( \frac{v_{lx} - v_{l0}}{v_{l0}} \left( B - \frac{\mu A}{1-\mu^2} \right) + \mu \right). \quad (6)$$

Это значение деформации в окружном направлении, учитывающее изменение скорости распространения ультразвуковых колебаний в материале диска пилы, подставляем в формулу (4):

$$w = \sum_{i=1}^n \sqrt{l_i^2 + \left( l_i \pm l_i \frac{1}{E} \left( \frac{v_{lx} - v_{l0}}{v_{l0}} \left( B - \frac{\mu A}{1-\mu^2} \right) + \mu \right) \right)^2}. \quad (7)$$

Применение уравнения (7) на практике позволяет определять изгиб кольцевой зоны круглой пилы.

Для подтверждения теоретической зависимости (7) был поставлен многофакторный эксперимент по типу полного факторного плана с тремя варь-

руемыми факторами (диаметр пилы ( $500 \text{ мм} \leq D \leq 710 \text{ мм}$ ); толщина пилы ( $2,2 \text{ мм} \leq h \leq 2,8 \text{ мм}$ ); коэффициент перекрытия измерений ( $0,1 \leq K \leq 1,0$ ; он характеризует угловой шаг измерения)) на экспериментальной установке (рис. 4), состоящей из регулируемого основания; вала, установленного на двух подшипниках, закрепленных в корпусе; двух фланцев диаметром 125 мм; механизма вертикального перемещения; индикатора часового типа; пьезоэлектропреобразователя; измерительного блока Krautkramer DM-5DL.

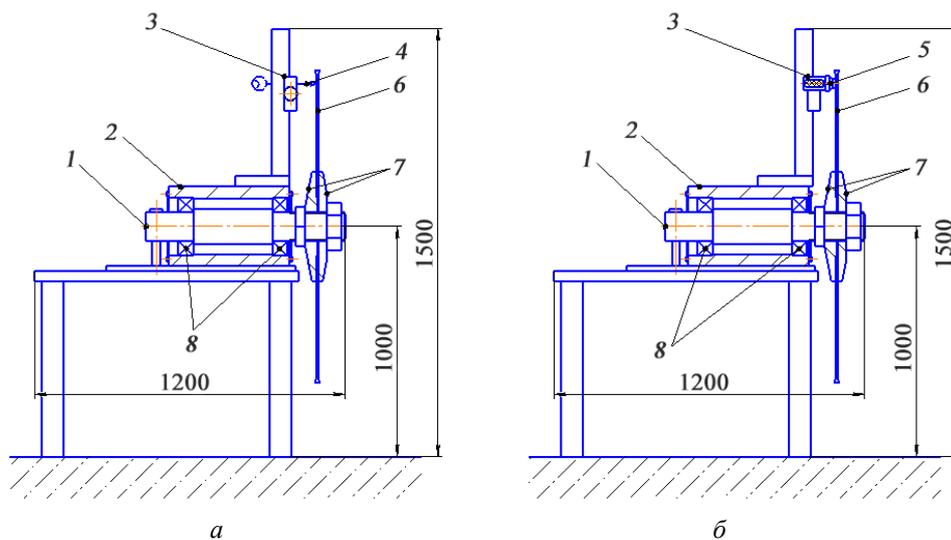


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения: *a* – отклонения от плоскостности; *б* – скорости распространения ультразвуковых колебаний; 1 – вал; 2 – корпус; 3 – крепление измерительного устройства; 4 – индикатор часового типа ИЧ-10; 5 – пьезоэлектро-преобразователь DA-501; 6 – пила; 7 – фланцы; 8 – подшипники

Регулируемое основание предназначено для нивелирования передвижения установки на эксплуатируемой поверхности. Регулирование производится путем вращения винтов, используемых в качестве ножек плиты, плиты фиксируется затяжкой гаек. В корпусе, на двух высокоточных подшипниках, установлен вал, на консольной части которого закрепляются фланцы. Первый фланец закрепляется на вал посредством резьбы, второй зажимается между установленной пилой и гайкой, накрученной на конец вала. Между фланцами возможна установка пилы с диаметром посадочного отверстия 50 мм и толщиной до 3 мм. Вращение вала позволяет изменять положение датчика относительно рассматриваемого объекта в окружном направлении.

Механизм вертикального перемещения предназначен для изменения положения датчика в радиальном направлении. Он закреплен на верхней части корпуса вала и состоит из двух вертикальных стоек, основания, верхней поперечной балки, ходового винта и траверсы. Перемещение траверсы осуществ-

ляется за счет вращения ходового винта по часовой стрелке. На траверсе крепятся индикатор часового типа ИЧ-10 и пьезоэлектрический преобразователь DA-501. Первый предназначен для измерения отклонения диска от плоскостности, второй представляет собой пьезоэлектрический преобразователь раздельно-совмещенного типа, подключаемый через соединительный кабель к измерительному блоку Krautkramer DM-5DL. Ниже приведена фотография экспериментальной установки (рис. 5).

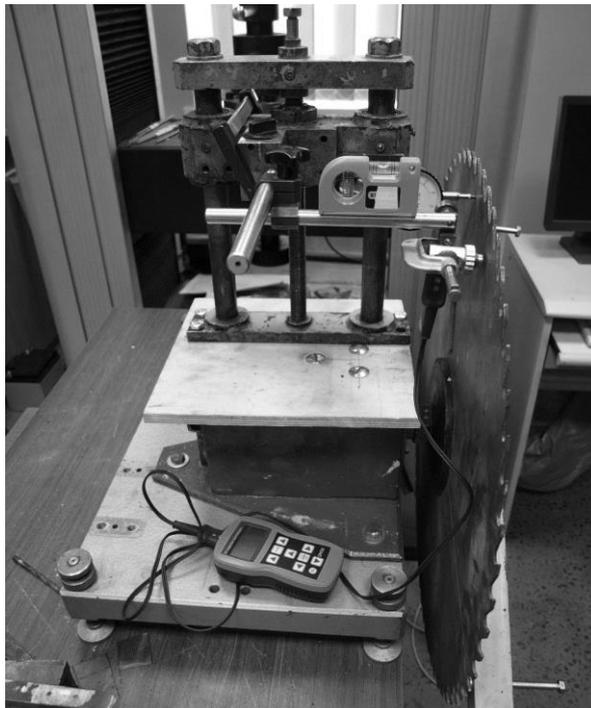


Рис. 5. Экспериментальная установка для контроля плоскостности круглых пил

Перед проведением основного эксперимента была запланирована серия предварительных опытов для установления характера распределения экспериментальных данных и статистических параметров выборки.

Прямое отклонение диска пилы от плоскостности измерялось индикатором часового типа ИЧ-10. Для этого пила устанавливалась в вертикальное положение и зажималась фланцами, установленными на вращающийся вал. Скорость распространения ультразвуковых колебаний измерялась по эхометоду, сначала при установке пилы в горизонтальное положение (чтобы найти точку отсчета, при которой отклонения диска от плоскостности отсутствуют), затем – в вертикальное положение как при прямом измерении. Кон-

троль проводился пьезоэлектропреобразователем DA-501 при частоте возбуждаемых колебаний 5 МГц.

Нормальность распределения экспериментальных данных определялась критериями асимметрии и эксцесса при прямом измерении, для контроля получены данные методом акустической тензометрии. Серии состояли из 50 измерений.

При прямом измерении асимметрия составляла  $0,521 \leq 0,989$ , поэтому она правосторонняя, эксцесс –  $0,958 \leq 2,988$ , т. е. распределение плосковершинное. При контроле методом акустической тензометрии асимметрия составляла  $0,429 \leq 0,989$  (правосторонняя), эксцесс –  $0,895 \leq 2,988$  (распределение плосковершинное). По результатам проверки было принято решение нормальности данных распределений.

Коэффициент корреляции экспериментальных данных при прямом измерении составлял 0,96, при контроле методом акустической тензометрии – 0,94, т. е. обе зависимости имеют линейный характер. Среднее значение при прямом измерении – 1,22 мм, при контроле акустической тензометрией – 1,19. Дисперсии выборок для прямого и неразрушающего методов измерения соответственно 1,01 и 1,05. Коэффициент вариации для обеих выборок – 2,6 %. Математическое ожидание при прямом измерении находится в диапазоне от 1,01 до 1,41 мм, при контроле методом акустической тензометрии – 0,99 до 1,39 мм.

Из результатов проведенных экспериментов следует, что принятые нами теоретические допущения правомерны и метод акустической тензометрии можно использовать для контроля плоскостности круглых пил.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Н.М.* Соппротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.
2. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
3. *Бэкофен В.* Процессы деформации / пер. с англ. В.С. Берковского и Ф.И. Рузанова; под ред. С.Е. Рокотьяна. М.: Металлургия, 1977. 288 с.
4. Измерения в промышленности: справ. Т. 2. М.: Металлургия, 1990. 384 с.
5. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
6. Неразрушающий контроль: справ. В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
7. *Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.* Интегралы и ряды. Элементарные функции. М.: Наука, 2002. 632 с.
8. *Стахийев Ю.М.* Работоспособность плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 384 с.
9. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.
10. Физические величины: справ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
11. *Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И.* Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 240 с.

12. Шимов Г.В., Буркин С.П. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / под общ. ред. С.П. Буркина. Екатеринбург: Урал. гос. ун-т, 2014. 160 с.

13. Lam T.T., Yeung W.K. Inverse Determination of Thermal Conductivity for One-Dimensional Problems // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1995. Vol. 9, iss. 2. Pp. 335–344. DOI: 10.2514/3.665

14. Lin J.Y., Cheng T.F. Numerical Estimation of Thermal Conductivity from Boundary Temperature Measurements // Numerical Heat Transfer. Part A: Applications. 1997. Vol. 32, iss. 2. Pp. 187–203.

15. Shah Vishu. Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis. Hoboken, USA: Wiley, 2007. 648 p.

Поступила 30.05.17

UDC 674.053:621.934/.936

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.104

#### **Flatness Control of Circular Saws**

*A.E. Alekseev, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*A.P. Alabyshev, Engineer*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: a.alabyshev@narfu.ru

Contact and noncontact control methods are used to define the flatness of flat products. Optical systems are exploited at noncontact testing. Contact surface monitoring involves the use of mechanical measurement systems or special converters of material physical quantities. Contact methods based on the study of physical parameters of material, allow monitoring the loss of the plate form of equilibrium of the object and the change of residual stresses. The resulting residual stresses have the highest value in the periphery of the disk due to increased heating of this saw zone. The deviation from the flatness of the disk due to the loss of a flat form of equilibrium is asymmetrical. We suggest using the method of acoustic strain measurement to control the flatness of flat circular saws. The principle of the method of acoustic strain measurement consists in changing the propagation velocity of ultrasonic vibrations in material when changing the magnitude of residual stresses. The proposed method involves splitting the disk into the annular zones with their subsequent scanning in the circumferential direction. The deviations of the annular zone from the flatness are characterized by the presence of deformation in the scanned zone and are compared with the zero values of the saw unexploited before. The experimental installation presented in this paper is designed to control the flatness of circular saws by the method of acoustic strain measurement and direct measurement using a dial gauge. In addition, prior to the experiment, the controlled saws are subjected to chemical analysis to demonstrate the conformity of the declared steel grade of all saws. We use a piezoelectric transducer DA-501 with an operating frequency of 5 MHz to excite ultrasonic vibrations in the controlled area; the measurements are performed by an echo method. As a result of the preliminary experiment, we establish the existence of normal distribution of the obtained experimental data. The

---

*For citation:* Alekseev A.E., Alabyshev A.P. Flatness Control of Circular Saws. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 6, pp. 104–113. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.104.

principal experiment is based on a full factorial design with three variable parameters. According to the results, we embrace the theoretical dependence and prove the possibility of using this method to control the flatness of circular saws.

*Keywords:* flatness, circular saw, acoustic strain measurement, ultrasonic vibration, residual stress.

#### REFERENCES

1. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 608 p. (In Russ.)
2. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical Diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (In Russ.)
3. Backofen W.A. *Deformation Processing*. Boston, USA, Addison-Wesley Pub., 1972. 326 p.
4. *Izmereniya v promyshlennosti. T. 2* [Measurements in Industry. Vol. 2]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 384 p. (In Russ.)
5. Lykov A.V., ed. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for Determination the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 336 p. (In Russ.)
6. Klyuev V.V., ed. *Nerazrushayushchiy kontrol': sprav. V 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol'* [Non-Destructive Testing: a Reference Book. In 7 Vol. Vol. 3. Ultrasonic Inspection]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (In Russ.)
7. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady. Elementarnye funktsii* [Integrals and Series. Elementary Functions]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 632 p. (In Russ.)
8. Stakhiev Yu.M. *Rabotosposobnost' ploskikh kruglykh pil* [The Performance of Flat Circular Saws]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 384 p. (In Russ.)
9. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 735 p. (In Russ.)
10. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical Quantities: a Reference Book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (In Russ.)
11. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Ostatochnye napryazheniya v deformiruemyykh tverdykh telakh* [Residual Stresses in Deformable Solids]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 240 p. (In Russ.)
12. Shimov G.V., Burkin S.P. *Osnovy tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Fundamentals of Technological Processes of Metal Forming]. Yekaterinburg, Ural State Univ. Publ., 2014. 160 p. (In Russ.)
13. Lam T.T., Yeung W.K. Inverse Determination of Thermal Conductivity for One-Dimensional Problems. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1995, vol. 9, iss. 2, pp. 335–344. doi: 10.2514/3.665
14. Lin J.Y., Cheng T.F. Numerical Estimation of Thermal Conductivity from Boundary Temperature Measurements. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, 1997, vol. 32, iss. 2, pp. 187–203.
15. Shah Vishu. *Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis*. Hoboken, USA, Wiley, 2007. 648 p.

Received on May 30, 2017