

УДК 629.4.015:625.1.03

## Определение оптимальных режимов резания при обточке железнодорожных колес

Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Кононов Д. П., Гомонец Ю. В. Определение оптимальных режимов резания при обточке железнодорожных колес // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 137-145. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-137-145

### Аннотация

**Цель:** Повышение стойкости режущего инструмента при восстановлении профиля поверхности катания железнодорожных колес за счет управления вибрациями системы «станок — инструмент — деталь». **Методы:** Исследовались вибрации, возникающие в процессе обточки поверхности катания вагонных колес при различных режимах резания. Для этого строилась матрица планирования эксперимента методом Бокса — Уилсона, в соответствии с которым изменяются все факторы по очереди (глубина резания, скорость резания, подача). По результатам каждой серии эксперимента выбирается математическая модель и оцениваются численные значения коэффициентов этого уравнения. В соответствии с принятыми в теории резания степенными зависимостями для проведенных экспериментов постулировалась математическая модель в виде логарифмического полинома ряда первой степени. Проводилась математическая обработка результатов измерений с помощью фрактальной размерности. Фрактальная размерность определялась методом нормированного размаха. **Результаты:** Установлено соответствие между стойкостью режущего инструмента и интенсивностью его колебаний при обточке железнодорожных колес. Получена математическая зависимость фрактальной размерности от режимов резания, позволяющая регулировать скорость резания или подачу в процессе восстановления поверхности катания колеса при наличии дефектов. Оптимальные режимы резания, позволяющие достичь заданного качества поверхности катания колеса за минимальное время, дают наибольшее значение фрактальной размерности. Наличие таких дефектов поверхности катания колеса, как ползуны, навары, выщербины, приводит к уменьшению фрактальной размерности. **Практическая значимость:** Определение фрактальной размерности в процессе обточки колесных пар дает возможность автоматически регулировать режимы резания для обеспечения заданного качества поверхности катания колеса и требуемой стойкости режущего инструмента.

**Ключевые слова:** Поверхность катания, стойкость, дефекты, режимы резания, колесо.

### Введение

Повышение качества железнодорожных колес имеет большое значение для народного хозяйства нашей страны и позволяет экономить значительное количество материальных средств, обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации. Современные условия работы железнодорожного транспорта постоянно ужесточаются: возрастают жесткость пути, скорости движения поездов, осевые нагрузки [1–4]. Все это свидетельствует об актуальности данной работы.

Большое влияние на надежность и долговечность колес оказывают геометрические и механические параметры профиля поверхности катания, который регламентируется стандартом. ГОСТ 10791—2011 предъявляет к точности размеров железнодорожных колес, к шероховатости их поверхности весьма высокие требования, удовлетворить которые возможно только механической обработкой, которая имеет ряд особенностей. К ним относятся колебания припуска на обработку, вызванные как особенностью профиля колеса, так и износом в процессе эксплуатации, а также значительные колебания твердости обрабатываемого материала, зависящие от химического состава данной плавки, особенности технологии изготовления заготовки, наличия дефектов поверхности катания. Все это вызывает изменение тепловых, силовых нагрузок в процессе резания и вибрации в широком диапазоне частот, отрицательно влияющих на износостойкость режущего инструмента, оборудование и производительность обработки [5].

### Влияние колебаний на износостойкость инструмента

Основным критерием обрабатываемости любых материалов является скорость резания, допускаемая режущим инструментом при определенной стойкости и других постоянных параметрах. В настоящее время при определении обрабатываемости материалов используются методы стойкостных испытаний, торцевого точения, температурных испытаний и др.

Среди множества характеристик процесса резания в качестве оптимальных критериев были взяты износостойкость режущего инструмента и высокое качество поверхностного слоя детали. Это достигается в тот момент, когда тангенциальная сила резания  $P_z$ , являющаяся функцией от скорости резания, становится стабильной.

Известно, что прочность и износостойкость инструмента зависят от колебаний в системе «станок — инструмент — деталь» (СИД), возникающих во время точения. При изменении параметров режима резания меняются спектр вибраций системы, а также его отдельные частотные составляющие [6–8]. В работе [9] установлено, что превышение определенных значений амплитуды колебаний, которые можно назвать критическими, приводит к сильному уменьшению износостойкости инструмента. При этом данное явление наблюдается при любой частоте. Чем выше частота колебаний, тем меньше критические значения амплитуды. Значения критических амплитуд колебаний, возникающих при обработке стали 45 твердостью 190 НВ твердым сплавом марки Т15К6, приведены в табл. 1. Режим резания:  $V = 2,15$  м/с,  $S = 2 \cdot 10^{-4}$  м/об,  $t = 5 \cdot 10^{-4}$  м.

ТАБЛИЦА 1. Значения критических амплитуд колебаний

Частота колебаний, кГц	10–15	7–10	3,5–4,5	2–3
Амплитуда колебаний, м	$(7-9)10^{-8}$	$(9-10)10^{-8}$	$(2-4)10^{-7}$	$(8-12)10^{-7}$

Износостойкость резцов можно определить по формуле [10]:

$$T = \Theta A^m e^{-nA},$$

где  $T$  — износостойкость режущего инструмента, мин;

$A$  — амплитуда колебаний, мкм;

$\Theta, m, n$  — коэффициенты, учитывающие условия резания, обрабатываемый и инструментальный материал.

Эту формулу можно применять в диапазоне частот от 150 до 3000 Гц. Она позволяет оценить величину износа режущего инструмента при разной амплитуде вибраций. Следующие причины приводят к снижению износа режущей кромки:

- повышенная пластическая деформация из-за большой амплитуды колебаний;
- пониженный коэффициент трения по задней и передней поверхностям режущего инструмента;
- отвод стружки при больших амплитудах колебаний становится проще;
- уменьшаются силы резания и др.

В то же время вибрации инструмента приводят к снижению усталостной прочности и последующему разрушению режущей кромки.

В связи с этим нужно сказать, что для обработки каждой конкретной детали на определенном станке существует оптимальная амплитуда колебаний, при которой износостойкость режущего инструмента максимальная. И для этой амплитуды необходимо определять соответствующие режимы резания.

## Экспериментальные исследования

Зависимость износостойкости режущего инструмента от вибраций можно определять разными способами. В данной работе было принято решение исследовать фрактальную размерность возникающих вибраций, что позволяет определить статистические характеристики случайным образом сформированной структуры [11, 12]. Чем больше фрактальная размерность, тем выше вибрации.

Существует несколько методов определения фрактальной размерности. Для исследования вибраций наиболее удобным является метод нормированного размаха. При его применении первоначально необходимо определить показатель Херста.

Для этого строится функциональная зависимость отношения размаха колебаний к среднеквадратическому отклонению ( $R/S$ ) от времени  $\tau$ :

$$R(\tau) / S(\tau) \sim \tau^H,$$

где  $H$  — показатель Херста.

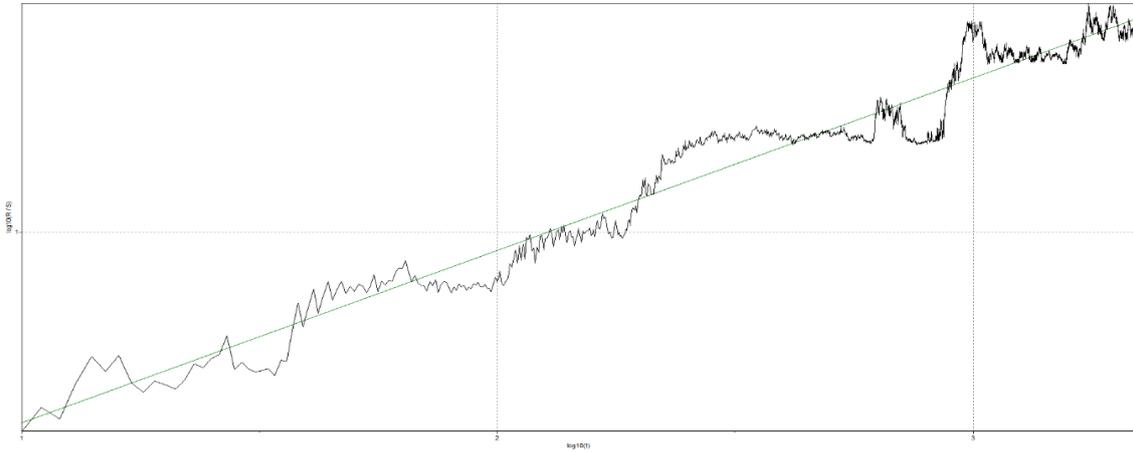


Рис. 1. Общий вид зависимости, по которой определяется показатель Херста

Данная зависимость строится в двойном логарифмическом масштабе (по оси абсцисс и ординат).

Следующим этапом является аппроксимация. Применяем линейную аппроксимацию. Тангенс угла наклона полученной прямой и является показателем Херста  $H$  (рис. 1).

На заключительном этапе, исходя из полученного значения показателя Херста, находится фрактальная размерность по формуле:

$$D = 2 - H .$$

Зависимость фрактальной размерности от глубины резания, подачи и скорости резания выражается формулой вида:

$$D(t, S, V) = C_D t^{x_D} S^{y_D} V^{z_D} ,$$

где  $C_D$  — коэффициент, учитывающий свойства материала заготовки и условия обработки;

$x_D, y_D, z_D$  — показатели степени влияния глубины резания, подачи и скорости резания на фрактальную размерность.

Для получения данной зависимости использовался метод планирования эксперимента Бокса — Уилсона. При этом принималась математическая модель в виде логарифмического полинома первой степени.

Для определения фрактальной размерности он выглядит следующим образом:

$$\ln D = \ln C_D + x_D \cdot \ln t + y_D \cdot \ln S + z_D \cdot \ln V .$$

Для определения фрактальной размерности был проведен эксперимент по измерению вибраций, возникающих в процессе обточки колесных пар, на различных режимах резания при наличии дефектов и без них.

ТАБЛИЦА 2. Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Размерность	Уровни факторов	
		нижний	верхний
Глубина резания, $t$	мм	4	5
Подача, $S$	мм/об	0,7	1,3
Скорость резания, $V$	об/мин	9,6	12,8



Рис. 2. Виброанализатор

Эксперимент проводился с помощью многофакторного анализа. Суть его состоит в том, что одновременно варьируются все заданные факторы. Каждый из факторов варьируется на двух уровнях — нижний и верхний (табл. 2).

Обрабатывались вагонные колеса, изготовленные из стали марки 2 ГОСТ 10791—2011 с дефектами поверхности катания и без них. Для обточки использовался колесотокарный станок UBB-112. В качестве режущего инструмента применялась тангенциальная пластина LNUX 301940 23 из твердого сплава марки KC-35.

Для измерения вибраций использовался двухканальный диагностический виброанализатор КОН.ТЕСТ С9000 с пьезоэлектрическими датчиками вибрации СТС АС102-1А (рис. 2). Датчик вибрации крепился на державку резца с помощью магнита.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

По результатам эксперимента и произведенных расчетов была получена функциональная зависимость фрактальной размерности от режимов резания:

$$D = e^{0,47113t - 0,01398S - 0,04649V - 0,05033}$$

Применение полученной зависимости дает возможность управлять режимами резания автоматически в процессе обточки колес без вмешательства оператора.

ТАБЛИЦА 2. Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	$X_0$	$X_1$		$X_2$		$X_3$		Среднее значение фрактальной размерности, $\bar{D}$
	код	код	$t$ , мм	код	$S$ , мм/об	код	$V$ , об/мин	
1	+	+	5	–	0,7	–	9,6	1,42065
2	+	+	5	+	1,3	–	9,6	1,44905
3	+		4	–	0,7	–	9,6	1,3781
4	+	–	4	+	1,3	–	9,6	1,36521
5	+	+	5	–	0,7	+	12,8	1,39264
6	+	+	5	+	1,3	+	12,8	1,30417
7	+	–	4	–	0,7	+	12,8	1,46166
8	+	–	4	+	1,3	+	12,8	1,37678

## Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальные режимы резания, позволяющие достичь заданного качества поверхности катания колеса за минимальное время, дают наибольшее значение фрактальной размерности.

2. Наличие таких дефектов поверхности катания колеса, как ползуны, навары, выщербины, приводит к уменьшению фрактальной размерности.

3. Определение фрактальной размерности в процессе обточки колесных пар дает возможность автоматически регулировать режимы резания для обеспечения заданного качества поверхности катания колеса и требуемой стойкости режущего инструмента.

## Библиографический список

1. Горячева И. Г. О пределах системы «колесо — рельс» в условиях тяжеловесного движения (трибологический аспект) / И. Г. Горячева, С. М. Захаров // Вакуумно-левитационные транспортные системы: научная основа, технологии и перспективы для железнодорожного транспорта. Коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — М.: ООО «РАС», 2017. — С. 27–42.

2. Захаров С. М. Особенности механизмов и причин возникновения контактно-усталостных повреждений колес железнодорожного подвижного состава / С. М. Захаров // Трение и смазка в машинах и механизмах. — М.: Инновационное машиностроение, 2007. — № 3. — С. 40–45.

3. Воробьев А. А. Разработка мероприятий по повышению ресурса железнодорожных колес с выщербинами / А. А. Воробьев, О. А. Конограй, Э. Ю. Чистяков // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. — Самара: СамГУПС, 2023. — С. 168–171.

4. Валинский О. С. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др. — Казань: Бук, 2022. — 324 с.
5. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог / А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов и др. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 264 с.
6. Диллон Дж. Сингх. Вопросы исследования динамического качества режущего инструмента: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Дж. Сингх. Диллон. — М., 1973. — 27 с.
7. Определение динамического качества расточных и проходных резцов и методы усовершенствования их конструкции / Отчет по НИР № 271, УДН, 1974. — 150 с.
8. Системный анализ основных параметров процесса резания и разработка системы показателей, характеризующих статическое и динамическое качество системы СПИД при назначении режимов резания / Отчет, № регистр. 78009181. — М.: УДН, 1979. — 115 с.
9. Шустиков А. Д. Анализ качества сборных проходных резцов / А. Д. Шустиков. — М.: НИИМаш, 1981. — 62 с.
10. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. — Л.: Машиностроение, 1986. — 174 с.
11. Международный междисциплинарный симпозиум ФиПС-01: Фракталы и прикладная синергетика // II Труды докладов конференции. — М.: Московский государственный областной университет, 2005. — 345 с.
12. Giona M. Multifractal analysis of chaotic power spectra / M. Giona, P. Piccirilli, V. Cimagalli // J. Phys. A. — 1991. — Vol. 24. — Iss. 1. — Pp. 367–373.

Дата поступления: 07.09.2023

Решение о публикации: 16.10.2023

#### **Контактная информация:**

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, проф.; [d\\_kononov@mail.ru](mailto:d_kononov@mail.ru)

ГОМОНЕЦ Юлия Витальевна — [homonets@mail.ru](mailto:homonets@mail.ru)

## **Determination of Optimal Cutting Modes when Turning Railway Wheels**

**D. P. Kononov, Yu. V. Homonets**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kononov D. P. Homonets Yu. V. Determination of Optimal Cutting Modes when Turning Railway Wheels. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 137-145. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-137-145

### **Summary**

**Purpose:** Increasing the durability of the cutting tool when reprofiling the tread of the railway wheels by controlling the vibrations of the “machine-tool-workpiece” system. **Methods:** Vibrations arising in the

process of turning the tread of car wheels under various cutting modes have been investigated. To do this, a matrix of experiment planning has been built using the Box-Wilson method, according to which all factors change in turn (cutting depth, cutting speed, feed). Based on the results of each series of the experiment, a mathematical model is selected and the numerical values of the coefficients of this equation are estimated. In accordance with the power dependences accepted in the theory of cutting, a mathematical model in the form of a logarithmic polynomial of a series of the first degree has been postulated for the experiments carried out. Mathematical processing of measurement results has been carried out using fractal dimension. The fractal dimension has been determined by the standardized range method. **Results:** A correspondence has been established between the durability of the cutting tool and the intensity of its vibrations when turning railway wheels. The mathematical dependence of the fractal dimension on the cutting modes is obtained, which allows to adjust the cutting speed or feed during the reprofiling the tread of the wheel when there are defects. Optimal cutting modes, which allow to achieve a given quality of the rolling surface of the wheel in the shortest time, give the highest value of the fractal dimension. The presence of such defects of the wheel tread, such as slid flat, buildups, shellings, leads to a decrease in the fractal dimension. **Practical significance:** The determination of the fractal dimension in the process of turning wheel pairs makes it possible to automatically adjust the cutting modes to ensure a given quality of the wheel tread and the required durability of the cutting tool.

**Keywords:** Tread, durability, defects, cutting modes, wheel.

## References

1. Goryacheva I. G., Zakharov S. M. O predelakh sistemy “koleso — rel’s” v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya (tribologicheskiy aspekt) [On the limits of the “wheel — rail” system in conditions of heavy traffic (tribological aspect)]. *Vakuumno-levitatsionnye transportnye sistemy: nauchnaya osnova, tekhnologii i perspektivy dlya zheleznodorozhnogo transporta. Kollektivnaya monografiya chlenov i nauchnykh partnerov Ob’edinennogo uchenogo soveta OAO “RZhD”* [Vacuum levitation transport systems: scientific basis, technologies and prospects for railway transport. Collective monograph of members and scientific partners of the Joint Academic Council of JSC Russian Railways]. Moscow: OOO “RAS” Publ., 2017, pp. 27–42. (In Russian)
2. Zakharov S. M. Osobennosti mekhanizmov i prichin vozniknoveniya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Features of mechanisms and causes of contact-fatigue damage to wheels of railway rolling stock]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax* [Friction and lubrication in machines and mechanisms]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2007, Iss. 3, pp. 40–45. (In Russian)
3. Vorob’ev A. A., Konogray O. A., Chistyakov E. Yu. Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu resursa zheleznodorozhnykh koles s vyshcherbinami [Development of measures to increase the service life of railway wheels with holes]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie na transporte: materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mechatronics, automation and control in transport: materials of the V All-Russian scientific and practical conferences]. Samara: SamGUPS Publ., 2023, pp. 168–171. (In Russian)
4. Valinskiy O. S., Vorob’ev A. A., Gubenko S. I. et al. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Increasing the performance of wheel pairs of rolling stock]. Kazan’: Buk Publ., 2022, 324 p. (In Russian)

5. Vorob'ev A. A., Gubenko S. I., Ivanov I. A. et al. *Resurs i remontoprigochnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog* [Resource and maintainability of wheel pairs of rolling stock of railways]. Moscow: INFRA-M Publ., 2011, 264 p. (In Russian)
6. Dillon Dzh. Singkh. *Voprosy issledovaniya dinamicheskogo kachestva rezhushchego instrumenta: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Research issues of the dynamic quality of cutting tools: abstract of thesis. diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow, 1973, 27 p. (In Russian)
7. *Opreделение dinamicheskogo kachestva rastochnykh i prokhodnykh reztsov i metody usovershenstvovaniya ikh konstruksii. Otchet po NIR № 271, UDN* [Determination of the dynamic quality of boring and passing cutters and methods for improving their design / Research report No. 271, UDN]. 1974, 150 p. (In Russian)
8. *Sistemnyy analiz osnovnykh parametrov protsessa rezaniya i razrabotka sistemy pokazateley, kharakterizuyushchikh staticheskoe i dinamicheskoe kachestvo sistemy SPID pri naznachenii rezhimov rezaniya. Otchet, № registr. 78009181* [System analysis of the main parameters of the cutting process and development of a system of indicators characterizing the static and dynamic quality of the AIDS system when assigning cutting modes. Report, register № 78009181]. Moscow: UDN Publ., 1979, 115 p. (In Russian)
9. Shustikov A. D. *Analiz kachestva sbornykh prokhodnykh reztsov* [Analysis of the quality of prefabricated cutters]. Moscow: NIIMash Publ., 1981, 62 p. (In Russian)
10. Zharkov I. G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom* [Vibrations during processing with a blade tool]. L.: Mashinostroenie Publ., 1986, 174 p. (In Russian)
11. *Mezhdunarodnyy mezhdistsiplinarnyy simpozium FiPS-01: Fraktaly i prikladnaya sinergetika* [International interdisciplinary symposium FiPS-01: Fractals and applied synergetics]. *II Trudy dokladov konferentsii* [II Proceedings of conference reports]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy oblastnoy universitet Publ., 2005, 345 p. (In Russian)
12. Giona M., Piccirilli P., Cimagalli V. Multifractal analysis of chaotic power spectra. *J. Phys. A*, 1991, vol. 24, Iss. 1, pp. 367–373.

Received: September 07, 2023

Accepted: October 16, 2023

**Author's information:**

Dmitry P. KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; d\_kononov@mail.ru

Yuliya V. HOMONETS — homonets@mail.ru