

УДК 621.91

**И. А. Иванов, Д. Д. Евсеев, И. В. Овсяникова, А. С. Тарапанов****МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПРОФИЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС**

Дата поступления: 30.06.2015

Решение о публикации: 21.07.2015

**Цель:** Предложить методологию исследования по повышению практического применения врезного профильного высокоскоростного шлифования (ВПВШ) профиля железнодорожных колес и на первом этапе выполнить моделирование и анализ возникающих сил резания на основе принятой модели кинематики формообразования и параметров срезаемого слоя. **Методы:** Проанализированы способы механической обработки профиля поверхности катания колесных пар подвижного состава. Показаны наиболее предпочтительные из них: токарная обработка, фасонное фрезерование и ВПВШ. Названы их особенности, а также преимущества ВПВШ. Инструмент для выполнения ВПВШ (фасонный шлифовальный круг) предложено интерпретировать как фрезу, работающую по генераторной схеме резания. Моделирование процесса формообразования номинальной поверхности профиля колесных пар предложено выполнить с помощью математического отображения кинематических схем резания, включающих параметры процесса шлифования. **Результаты:** Выполнено моделирование и предложены алгоритмы, описывающие случайный характер возникновения составляющих сил резания при восстановлении профиля поверхности катания колесных пар с неоднородной структурой материала. Для выявления статистических особенностей случайным образом сформированной в процессе эксплуатации структуры металла поверхности катания использованы фрактальные размерности и метод случайных сложений. При этом выделен монофрактал, который несет в себе основные статистические свойства мультифрактала с однозначно определенной размерностью. Сформированный далее мультифрактал раскладывается на спектр монофракталов путем вейвлет-преобразования. При реализации способа ВПВШ имеет место переход в диапазон высокоскоростной обработки, при котором возможно возникновение процесса сверхрезания. Этот процесс характеризуется снижением сил резания за счет образования в зоне резания материи в сверхтекучем состоянии под действием мощного энергетического воздействия. **Практическая значимость:** Предложенная методика позволяет сформировать предпосылки для управления параметрами процесса ВПВШ и перейти к практическому исследованию условий возникновения процесса сверхрезания.

Восстановление колёсных пар, шлифование, фрактал, скоростное резание.

\***Igor A. Ivanov**, D. Eng., professor, ivanov\_1\_7@mail.ru (Petersburg State Transport University), **Dmitriy D. Yevseev**, Cand. Sci. (Eng.), dd.evseev@gmail.com (Oryol MK JSC), **Irina V. Ovsyanikova**, Cand. Sci. (Econ.), associate professor, ovsyanikova2012@rambler.ru, **Alexandr S. Tarapanov**, D. Eng., professor, tarapanov@rambler.ru (State University – Education-Science-Production Complex)  
SIMULATION OF CUTTING FORCES DURING THE GRINDING OF WHEEL SETS PROFILE

**Objective:** To propose a methodology for study of increasing practical use of cut-in profile high-speed grinding of wheel sets profile, and, as the initial stage, to carry out simulation and analysis of emerging cutting forces on the basis of an assumed model of forming kinematics and parameters of a layer being cut. **Methods:** Methods of mechanical treatment of tread surface profile of wheels sets of rolling stock were analysed. Most preferable of these were identified as lathe turning, form mining and cut-in profile high-speed grinding. Their specific features were named, as were advantages offered by cut-in profile high-speed grinding. It was proposed to interpret an instrument for cut-in profile high-speed grinding

(shaped grinding wheel) as a milling cutter operating on oscillating circuit of cutting. It is proposed to simulate the process of forming the nominal surface of wheel sets profile by mathematical mapping of kinematic cutting schemes which include grinding process parameters. **Results:** Simulation was conducted, and algorithms were proposed, describing random character of occurrence of cutting force components in restoring the profile of tread surface of wheel pairs with heterogenous structure of material. Fractal dimensions and random additions method were used to determine statistical peculiarities of tread surface's metal structure, formed randomly in the process of operation. In the process, a monofractal which holds main statistical properties of a multifractal system with uniquely identified dimensionality was isolated. A multifractal system is then decomposed into a spectrum of monofractals by wavelet decomposition. During realisation of cut-in profile high-speed grinding method a transition into the high-speed machining range occurs, under which super-cutting process may appear. This process is characterised by decreasing cutting forces due to forming of substance in a superfluid state in the cutting zone under the influence of powerful energy deposition. **Practical importance:** The proposed method allows to form prerequisites for managing parameters of cut-in profile high-speed grinding process and to proceed with practical study of conditions of super-cutting process occurring.

Wheel set restoration, grinding, fractal, high-speed cutting.

В работе [1] приведена классификация способов механической обработки профиля поверхности катания колесных пар подвижного состава железных дорог. Предпочтительны токарная обработка, фасонное фрезерование, врезное профильное высокоскоростное шлифование (ВПВШ) и комбинированные способы обработки, которые включают в себя механические и физические способы (например, механическую обработку и индукционное или локальное лазерное упрочнение, рассмотренное в работах [10, 11]).

На практике в настоящее время наиболее распространены токарная обработка и фасонное фрезерование. Недостатком этих способов и их технологических схем является низкая способность инструмента адаптироваться к неоднородной (при наличии ползунов, выщербин и других дефектов) структуре обрабатываемого материала поверхности катания колеса, что приводит к так называемому технологическому износу (из-за желания сохранить инструмент обработка ведется «под корку» [11], при этом удаляется работоспособный слой металла обода). В результате снижаются производительность обработки и ресурс колеса, возрастает расход инструмента. Необходимо разработать новые и усовершенствовать имеющиеся способы восстановления

колесных пар с неоднородной структурой материала. В работах в области совершенствования фасонного фрезерования [5, 6] отмечены положительные результаты: увеличен период стойкости инструмента в 1,5–2 раза. В [12] отмечено, что значительно улучшить процесс механической обработки при восстановлении профиля катания колеса позволяет ВПВШ. Эффективность ВПВШ обусловлена отсутствием необходимости обработки «под корку», экономией металла обода, повышением ресурса колеса, обеспечением требуемой шероховатости обработанной поверхности и высокой производительностью. Однако потенциально перспективный способ механической обработки ВПВШ в настоящее время ещё не нашел широкого практического внедрения, потому что не имеет необходимой теоретической и опытно-экспериментальной проработки.

Всестороннее изучение способа ВПВШ и разработка новых технологических схем по его применению и управлению технологическими параметрами позволит повысить практическое применение данного способа механической обработки, обладающего потенциально высокой эффективностью (основные параметры режима: скорость резания 100–150 м/с, подача врезания 5–15 мм/мин).

Методология научного исследования по повышению практического применения способа ВПВШ предполагает:

- разработку математического отображения кинематической схемы резания для определения параметров срезаемого слоя и изменения кинематических углов режущих лезвий;
- моделирование и анализ возникающих сил резания на основе принятой модели кинематики формообразования и параметров срезаемого слоя;
- разработку, обоснование и использование алгоритмов, описывающих случайный характер возникновения составляющих сил резания;
- обоснование и применение феноменологических способов для описания предположительно возникающих и не в полной мере изученных процессов при ВПВШ с целью разработки технологических схем управления ими;
- разработку методики экспериментальных исследований и практических рекомендаций по мере ее реализации.

### Разработка алгоритма моделирования и анализа сил, возникающих в процессе ВПВШ

Инструмент для выполнения ВПВШ (фасонный шлифовальный круг) предлагается интерпретировать как фрезу, работающую по генераторной схеме резания [1]. Такая интерпретация позволяет проанализировать кинематику формообразования поверхности катания колесной пары с применением ВПВШ на основе разработанного в [2] обобщенного математического отображения кинематических схем резания поверхности катания колесных пар и определить параметры срезаемого слоя аналогично методике, примененной в [3].

Фасонный круг для ВПВШ отличается от фасонной фрезы количеством отдельных режущих элементов (рис. 1). Количество ре-

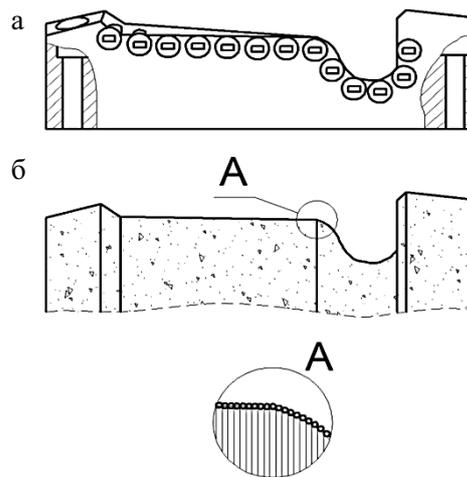


Рис. 1. Аналогия представления режущей части фасонной фрезы (а) и шлифовального круга (б)

жущих элементов для шлифовального круга можно определить как отношение длины формообразующей кромки круга к среднестатистическому размеру (диаметру) зерна шлифовального круга. Отклонением геометрических параметров зерен и их размеров от среднестатистических размеров пренебрегаем ввиду их малости по сравнению с диаметром инструмента, определяющим главное движение и скалярную величину вектора скорости резания.

Особенности описания режущего лезвия кромки инструмента для ВПВШ и кинематики процесса формообразования представляют значительную трудность при определении сил резания. Проблему решает применение геометрических фракталов [7, 13], реализованное аналогично способу фасонного фрезерования в работе [4].

Формообразующая кинематика шлифовального круга идентична кинематике при обработке фасонной фрезой. Поверхность катания формируется от воздействия всех режущих зерен круга без продольной подачи.

Процесс формообразования номинальной поверхности колесных пар целесообразно моделировать с помощью математического отображения схемы резания, включающего такие параметры резания, как главное движение разрушения припуска, движение подачи,

кинематическое изменение углов режущей части инструмента. Необходимо иметь возможность оценивать состояние отдельных участков поверхности катания, материал инструмента и их физико-химические характеристики в любой точке зоны обработки.

Для описания процесса резания материала обода колеса с неоднородной структурой сила резания раскладывается на две составляющие: детерминированную и случайную.

Детерминированная составляющая однозначно определена кинематикой формообразования и рассчитывается по методике, изложенной в [4], при обработке материала в состоянии поставки, имеющего постоянную твердость в зоне резания.

Случайная составляющая силы резания зависит от распределения твердости по поверхности катания обода колеса и, как следствие, определяется изменением структуры (наличием ползунов, выщербин и др.) материала, поэтому вид случайной нагрузки в процессе обработки колесной пары, имеющей термомеханические повреждения, несет в себе статистические свойства структуры материала. Можно принять, что случайная нагрузка фрактальна, как и распределение поверхностной твердости обода колеса.

Как следует из исследований, выполненных в [4], действительная сила резания может быть описана уравнением

$$P(t) = P_k(t) \cdot \left( \frac{HB(t)}{HB_k} \right)^n = P_k(t) \cdot (A(t))^n, \quad (1)$$

где  $P(t)$  и  $P_k(t)$  – сила резания при обработке поверхности с изменяющейся твердостью и сила, определенная кинематикой формообразования, соответственно;  $HB(t)$  и  $HB_k$  – изменяющаяся поверхностная твердость в зоне резки и твердость материала в состоянии поставки, соответственно;  $A(t)$  – коэффициент изменения относительной поверхностной твердости;  $n$  – число наблюдений.

Для интерпретации случайной силы резания необходимо рассчитать фрактальные размерности коэффициента усиления  $A$  из

формулы (1) и определить диапазон изменения. Фрактальная размерность позволяет выявить статистические особенности случайным образом сформированной структуры.

Для определения фрактальной размерности временного ряда на практике чаще применяют метод нормированного размаха, использующий зависимость фрактальной размерности от показателя Херста:

$$D = 2 - H,$$

где  $D$  – фрактальная размерность множества;  $H$  – показатель Херста.

Показатель Херста для множества может быть приближен посредством вычисления наклона линии через простую регрессию методом наименьших квадратов. В частности,

$$\ln\left(\frac{R}{S}\right) = \ln(c) + H \cdot \ln(n),$$

где  $R$  – разность максимального и минимального накопленного отклонения;  $S$  – стандартное отклонение;  $\frac{R}{S}$  – нормированный размах;  $c$  – мера корреляции;

Для интерпретации силы резания необходимо численно смоделировать коэффициент усиления  $A$  из формулы (1). Для моделирования фрактальной структуры эффективен метод случайных сложений.

В основе алгоритма, который заложен в методе случайных сложений, лежит утверждение, что дисперсия приращения координаты на каждой последующей итерации должна удовлетворять равенству

$$\sigma_i^2 = r^{2(2-D)i} \sigma_0^2, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент уменьшения масштаба;  $\sigma_0^2$  – начальная дисперсия случайных сложений,  $\sigma_0^2 = 1$ ;  $D$  – фрактальная размерность генерируемого множества;  $i$  – номер итерации.

Данный алгоритм подразумевает применение выборки из нормального распределения. Известно, что дисперсия суммы нормальных случайных величин равна сумме дисперсий этих величин. Следовательно, дисперсия сгенерированного после любого количества итераций множества равна сумме дисперсий всех итераций:

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^k \sigma_i^2. \quad (3)$$

Частотные характеристики моделируемой структуры и случайной составляющей нагрузки тождественны. У случайной составляющей силы резания состав частот можно ограничить значимостью вклада составляющих частотного спектра. Частотный спектр смоделированного множества также конечен и характеризуется количеством итераций. При анализе формул (2) и (3) становится очевидным, что при бесконечном количестве итераций (спектре частот) дисперсия стремится к конечному значению. Как показывают графики (рис. 2), дисперсия уже после небольшого количества итераций мало отличается от предельного значения. Соответственно, для эффективного моделирования достаточно выполнить такое количество итераций, которое обеспечит достаточно близкое приближение к предельной дисперсии. Для срединного значения  $D = 1,5$  из интервала  $D \in (1; 2)$ , описывающего возможные фрактальные размерности, достаточное

количество итераций лежит около  $k = 9$  (рис. 2), что соответствует количеству точек множества  $2^k = 2^9 = 512$ .

Множества, полученные методом случайных сложений, являются мультифракталами со спектром фрактальных размерностей в области, заданной при моделировании центральной фрактальной размерности.

Для выявления случайной составляющей силы резания необходимо выделить монофрактал, который будет нести в себе основные статистические свойства мультифрактала с однозначно определенной размерностью. В этом случае его размерность будет максимальной из спектра фрактальных размерностей и близка к центральной размерности мультифрактала.

Вейвлет-преобразование с его иерархическим базисом хорошо приспособлено для анализа фрактальных и мультифрактальных множеств, имеющих иерархическую природу. Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования – значений коэффициентов  $W(a, b)$ . Распределение этих значений в пространстве  $(a, b) = (\text{временная локализация, временной масштаб})$  дает информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени.

Раскладывая мультифрактал по уровням с помощью вейвлет-преобразования, необходимо определить уровень с наибольшей фрактальной размерностью и выделить соответствующее ей множество, которое будет

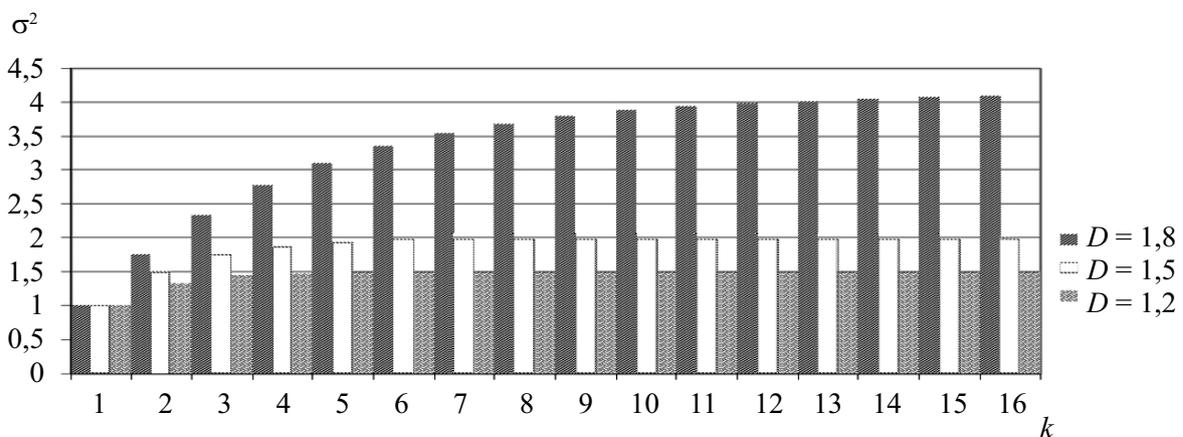


Рис. 2. Зависимость дисперсии  $\sigma^2$  моделируемого множества от количества итераций  $k$  при значениях фрактальной размерности  $D = 1,2; 1,5; 1,8$

с достаточной степенью точности описывать коэффициент усиления  $A$  из формулы (1) и, как следствие, статистически описанную силу резания.

При обработке фасонным инструментом одновременно формируется периметр поперечного сечения колесной пары, поэтому мерой фрактальной размерности коэффициента усиления  $A$  при расчете силы резания может служить значение, рассчитанное как среднее арифметическое фрактальных размерностей, полученных для пяти характерных участков профиля катания. В частном случае, приведенном в [4], значение фрактальной размерности составило 1,6.

Для формирования коэффициента изменения относительной твердости  $A$  фрактального вида с ограниченным спектром частот сформируем мультифрактал заданной размерности на основе метода случайных сложений (рис. 3).

Далее разложим полученный мультифрактал на спектр монофракталов путем вейвлет-преобразования (рис. 4).

Определим фрактальную размерность монофракталов (рис. 5, 6), полученных из вейвлет-спектра путем разложения на

уровни  $a$ . Для монофрактала, имеющего максимальную (центральную) размерность, определим множество формирующих его точек. Изображенный на рис. 7 монофрактал представляет собой математически смоделированное множество, описывающее изменение коэффициента относительной твердости  $A(t)$  во времени.

Описанная методика позволяет формировать предпосылки для управления параметрами обработки, в частности, поперечной подачей (в данном случае продольная подача реализуется за счет генераторной схемы резания) и соотношением скоростей вращения колесной пары и шлифовального круга (скоростью резания), влияющими на толщину срезаемого слоя, а также прогнозировать изменение силы резания под действием термомеханических повреждений.

Следует отметить, что при ВПВШ наблюдается переход в диапазон высокоскоростной обработки, при котором может возникнуть процесс сверхрезания. Данный процесс характеризуется снижением сил резания за счет вероятного образования в зоне резки материи в сверхтекучем состоянии под влиянием мощного энергетического



Рис. 3. Мультифрактал заданной фрактальной размерности  $D = 1,6$ , сформированный методом случайных сложений

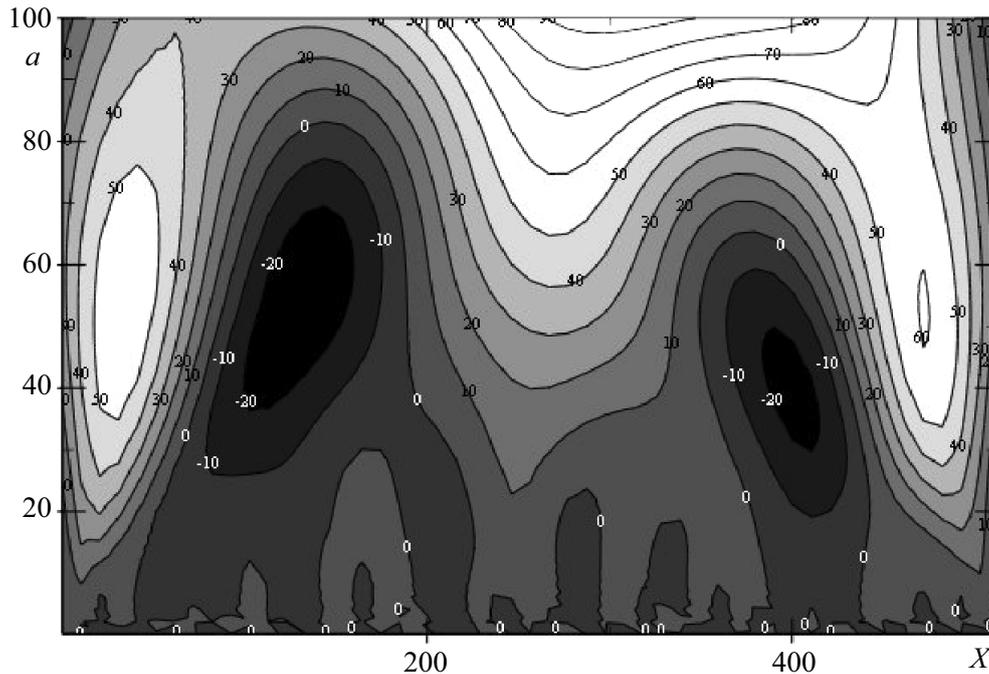


Рис. 4. Вейвлет-спектр мультифрактала, представленного на рис. 3

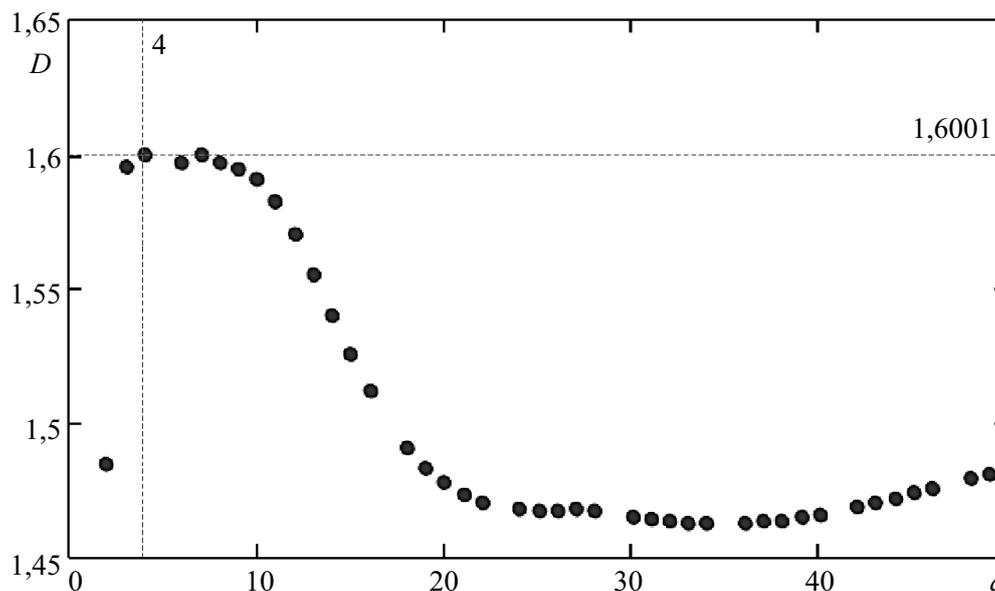


Рис. 5. Спектр фрактальных размерностей мультифрактала, представленного на рис. 3.  
Максимальная фрактальная размерность  $D = 1,6$  для уровня  $a = 4$

воздействия [8]. Причем данный процесс сопровождается интенсивным отводом тепла из зоны резания. В то же время при экспериментальной высокоскоростной обработке стали с высокими показателями прочности и твёрдости на удаление части тепла из зоны

резания более интенсивно влияет подача, чем скорость резания [9]. Несмотря на то, что при увеличении скорости резания объём тепла резания постоянно увеличивается, при большой подаче часть тепла резания, поступающего в обрабатываемую деталь, умень-

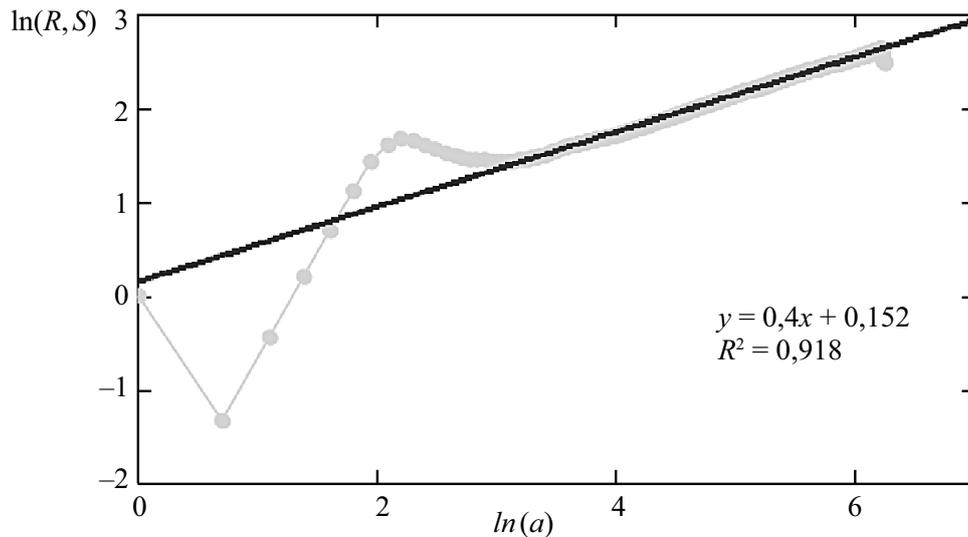


Рис. 6. График к определению фрактальной размерности монофрактала, выделенного вейвлет-спектром для уровня  $a = 4$ . Фрактальная размерность  $D = 2 - 0,4 = 1,6$

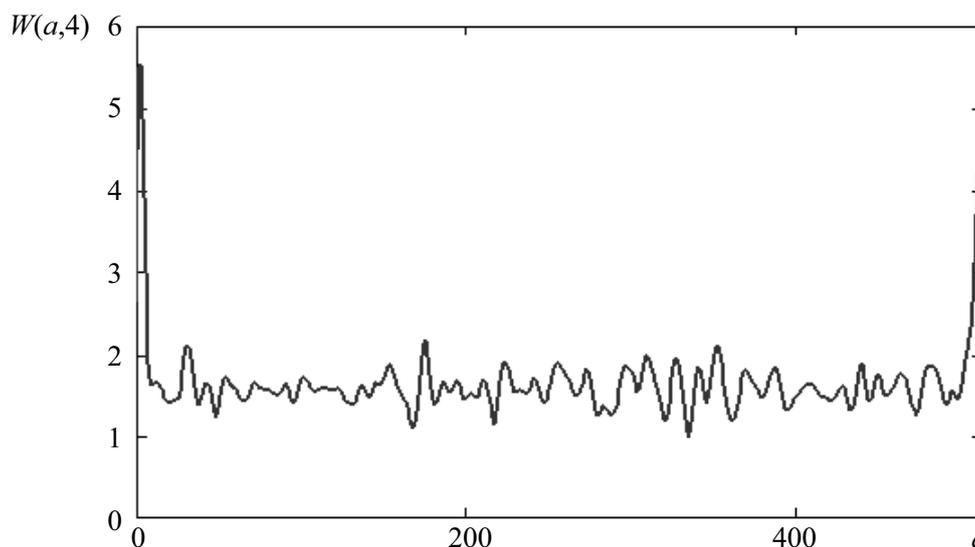


Рис. 7. Монофрактал, описывающий коэффициент изменения относительной твердости  $A$ , полученный путем выделения уровня  $a = 4$  из вейвлет-спектра с наибольшей фрактальной размерностью

шается сверхпропорционально, а температура поверхности резания обрабатываемой детали понижается.

### Заключение

1. Отмечены недостатки используемых методов восстановления профиля поверх-

ности катания колес и достоинства процесса ВПВШ.

2. Предложена методология исследования процесса ВПВШ для его практического применения при обработке колесных пар при ремонте.

3. Выполнено моделирование и предложены алгоритмы определения сил резания при обработке материала обода колеса с неодно-

родной структурой (с ползунами, выщербинами и другими дефектами) с использованием ВПВШ.

### Библиографический список

1. Алехин С. В. Систематизация и анализ методов формообразования профиля катания колесных пар / С. В. Алехин, И. А. Иванов // Вопросы оптимизации технологических процессов и оборудования ремонтного производства. – Л. : ЛИИЖТ, 1976. – Вып. 395. – С. 41–54.
2. Евсеев Д. Д. Математическое отображение кинематических схем резания для механической обработки поверхности катания колесных пар / Д. Д. Евсеев, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов // Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении : Материалы III Междунар. науч.-технич. семинара, г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2003. – С. 43–46.
3. Евсеев Д. Д. Моделирование процесса обработки поверхности катания колесных пар железнодорожного транспорта с термомеханическими дефектами случайного характера / Д. Д. Евсеев // Изв. ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 3. – С. 74–79.
4. Евсеев Д. Д. Повышение периода стойкости фрез для обработки поверхности катания колесных пар : дис. ... канд. техн. наук / Д. Д. Евсеев. – Орёл : ОрелГТУ, 2010. – 193 с.
5. Пат. РФ № 2268 111, МПК В 23 С 3/02. Способ фрезерования адаптирующимся инструментом / Д. Д. Евсеев, Ю. С. Степанов, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов и др. Заявл. 2004106134/02, 02.03.2004; опубл. 20.01.2006. – Бюл. № 02.
6. Сладковский А. В. Проектирование сборных фасонных фрез для восстановительного ремонта поверхности катания колесных пар локомотивов на станках КЖ20 / А. В. Сладковский, В. М. Рубан // Транспорт Урала. – 2010. – № 4 (27). – С. 27–31.
7. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
8. Ярославцев В. М. Новое о процессе резания / В. М. Ярославцев // Наука и образование. – 2011. – № 7.
9. Aranson R. High-speed processing / R. Aranson // Manuf. Eng. – 2001. – Vol. 127, N 4. – P. 68–74, 76–80.
10. Gubenko S. Investigation of possibility of local laser strengthening of railway wheels / S. Gubenko, Y. Proidak, A. Shramko // Transp. prob. – 2012. – Vol. 7, Is. 1. – P. 129–134.
11. Ivanov I. A. Methods of recovery of serviceability of railway wheels during the repairs / I. A. Ivanov // Transp. and Eng., Railway Transp. – 2004. – Ser. 6, sej. 17. – P. 43–54.
12. Ivanov I. Recovery tread wheel pair of machining / I. Ivanov, A. Tarapanov, D. Kononov, A. Vorobev // Transp. prob. – 2013. – Vol. 8, Is. 3. – P. 105–113.
13. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature / B. Mandelbrot. – NY : W. H. Freeman, 1982. – 205 p.

### References

1. Alekhin S. V. & Ivanov I. A. *Voprosy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov i oborudovaniya remontnogo proizvodstva – Issues of Optimisation of Technol. Proc. and Servicing Repairs Industry*. Leningrad, LIIZhT, 1976. Is. 395. Pp. 41–54.
2. Yevseyev D. D., Tarapanov A. S. & Kharlamov G. A. *Matematicheskoye otobrazheniye kineticheskikh skhem rezaniya dlya mekhanicheskoy obrabotki poverkhnosti kataniya kolesnykh par* [Mathematical Mapping of Kinematic Schemes of Cutting for Mechanical Processing of Tread Surface of Wheel Pairs]. *Sovremennyye problemy podgotovki proizvodstva, obrabotki i sborki v mashinostroyenii i priborostroyenii: materialy III Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminarara* (Modern Problems in Preparation of Production, Processing and Assembly in Machine and Instrument Engineering: proc. of the 3rd int. sci. and pract. seminar), Svaliava. Kyiv, ATM Ukrainy, 2003. Pp. 43–46.
3. Yevseyev D. D. *Izvestiya OrelGTU. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii – Proceedings of the State Univ. Education-Science-Pro-*

*duction Complex. Fundamental and Applied Probl. of Eng. and Tech.*, 2010, no. 3, pp. 74-79.

4. Yevseyev D.D. Povysheniye perioda stoykosti frez dlya obrabotki poverkhnosti kataniya kolesnykh par [Increasing the Period of Durability of Milling Tools for Processing Tread Surface of Wheel Pairs]. Oryol, OryolGTU, 2010. 193 p.

5. Russian Federation Patent No. 2268 111, MPK V 23 S 3/02. Sposob frezerovaniya adaptiruyushchimsya instrumentom (Milling Method Deploying Adaptable Instrument). D.D. Yevseyev, Yu. S. Stepanov, A. S. Tarapanov, G. A. Kharlamov et al. Publ. 20.01.2006. *Byulleten – Bulletin* No. 02.

6. Sladkovskoy A. V. & Ruban V.M. *Transport Urala – Urals Transp.*, 2010, no. 4 (27), pp. 27-31.

7. Feder Ye. *Fraktaly* [Fractals]. Moscow, Mir, 1991. 254 p.

8. Yaroslavtsev V.M. *Nauka i obrazovaniye – Sci. and Educ.*, 2011, no. 7.

9. Aranson R. *Manuf. Eng.*, 2001, Vol. 127, no. 4, pp. 68-74, 76-80.

10. Gubenko S., Proidak Y. & Shramko A. *Transp. prob.*, 2012, Vol. 7, Is. 1, pp. 129-134.

11. Ivanov I.A. *Transp. and Eng., Railway Transp.*, 2004, Ser. 6, sej. 17, pp. 43-54.

12. Ivanov I., Tarapanov A., Kononov D. & Vorobev A. *Transp. prob.*, 2013, Vol. 8, Is. 3, pp. 105-113.

13. Mandelbrot B. *The Fractal Geometry of Nature*. NY, W.H. Freeman, 1982. 205 p.

\*ИВАНОВ Игорь Александрович – д-р техн. наук, профессор, ivanov\_1\_7@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщений Императора Александра I); ЕВСЕЕВ Дмитрий Дмитриевич – канд. техн. наук, dd.evseev@gmail.com (ООО «Орёл МК»); ОВСЯНИКОВА Ирина Васильевна – канд. экон. наук, доцент, ovsynikova2012@rambler.ru; ТАРАПАНОВ Александр Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, tarapanov@rambler.ru (Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс).