

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-5-62-66

КРАТНОМАСШТАБНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРОФИЛОГРАММЫ

ГАЙДАР СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, д-р техн. наук, профессор

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

ПАВЛОВ АЛЕКСАНДР ЕГОРОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доцент

alexpavlov60@mail.ru; <https://orcid.org/0000-5870-7960>; Scopus Author ID: 60069979; Researcher ID: AAE-6169-2022

ПИКИНА АННА МИХАЙЛОВНА ✉, ассистент

pikina@rgau-msha.ru ✉

ВЕТРОВА СОФЬЯ МИХАЙЛОВНА, аспирант

techmash@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. На функциональные свойства поверхности существенно влияет её микрогеометрия, поэтому необходима оптимизация параметров микрогеометрии поверхности металлических конструкций. Анализ и оценка микрогеометрии поверхности позволяют провести оценку усталостной прочности металлических конструкций. С целью исследования зависимости долговечности тонколистовых конструкций от степени коррозионного разрушения проведён анализ микрогеометрии поверхности при помощи профилометра 130 в соответствии с ГОСТ 25142-82. В качестве исследуемого материала использовалась малоуглеродистая холоднокатаная сталь 08кп. Шероховатость поверхности образцов составила $R_a = 0,22$ мкм. Параметры шероховатости вычислялись согласно ГОСТ 2789-73. Исследовалась профилограмма, представляющая собой дискретный ряд значений пиков и впадин рельефа поверхности металлической пластины. Для оценки микрогеометрии поверхности применён вейвлет-анализ, позволяющий проводить обработку нестационарных во времени или неоднородных в пространстве сигналов. Сигнал в виде последовательных приближений имеет тренд, циклические компоненты и локальные особенности (флуктуации) вокруг составляющих сигнала. Свойство локальности вейвлетов даёт преимущества перед тригонометрическим преобразованием Фурье: синусы и косинусы определены на всей числовой оси, а вейвлеты имеют компактный носитель. Для кратномасштабного анализа разработан быстрый каскадный алгоритм вычислений по аналогии с быстрым преобразованием Фурье. В исследовании проведено разложение сигнала до 9-го уровня. Восстановленные детализирующие коэффициенты представляют высокочастотные и низкочастотные флуктуации. Показана целесообразность применения кратномасштабного вейвлет-анализа Хаара для оценки микрогеометрии металлических поверхностей.

Ключевые слова: шероховатость, вейвлет-анализ, ортонормированный базис Хаара, профилограмма, профилометр.

Формат цитирования: Гайдар С.М., Павлов А.Е., Пикина А.М., Ветрова С.М. Кратномасштабный вейвлет-анализ профилограммы // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 62-66. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-62-66>.

© Гайдар С.М., Павлов А.Е., Пикина А.М., Ветрова С.М., 2022



ORIGINAL PAPER

MULTIPLE-SCALE WAVELET ANALYSIS OF THE PROFILOGRAM

SERGEY M. GAIDAR, Doctor of Technical Sciences, Professor

techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>; Scopus Author ID: 57191589797; Researcher ID: I-4723-2018

ALEKSANDR E. PAVLOV, PhD, Associate Professor

alexpavlov60@mail.ru <https://orcid.org/0000-5870-7960>; Scopus Author ID: 60069979; Researcher ID: AAE-6169-2022

ANNA M. PIKINA ✉, assistant

pikina@rgau-msha.ru ✉

SOFYA M. VETROVA, graduate student

techmash@rgau-msha.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The functional properties of the surface are significantly affected by its microgeometry, therefore it is necessary to optimize the parameters of the microgeometry of the surface of metal structures. The analysis and evaluation of the microgeometry

of the surface allows an assessment of the fatigue strength of metal structures. In order to study the dependence of the durability of thin-sheet structures on the degree of corrosion destruction, the microgeometry of the surface was analyzed using a profilometer 130 in accordance with GOST 25142-82. Low-carbon cold-rolled steel 08kp was used as the test material. The surface roughness of the samples was $R_a = 0.22$ microns. The roughness parameters were calculated according to GOST 2789-73. A profilogram representing a discrete series of values of peaks and troughs of the relief of the metal plate surface was studied. To assess the microgeometry of the surface, a wavelet analysis was used, which allows processing signals that are nonstationary in time or inhomogeneous in space. The signal in the form of successive approximations has a trend, cyclic components and local features (fluctuations) around the components of the signal. The locality property of wavelets gives advantages over the trigonometric Fourier transform: the sines and cosines are defined on the entire numerical axis, and the wavelets have a compact carrier. For multiscale analysis, a fast cascade algorithm of calculations has been developed by analogy with the fast Fourier transform. In the study, the signal was decomposed to the 9th level. The reconstructed detailing coefficients represent high-frequency and low-frequency fluctuations. The decomposition of the signal to the 9th level made it possible to analyze the surface roughness of the 08kp steel using a multiple-scale wavelet analysis.

Keywords: roughness, wavelet analysis, Haar's orthonormal basis, profilogram, profilometer

For citation: Gaidar S.M., Pavlov A.E., Pikina A.M., Vetrova S.M. Multiple-scale wavelet analysis of the profilogram. Agricultural Engineering (Moscow), 2022; 24(5): 62-66. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-62-66>.

Введение. При электрохимической коррозии на поверхности металла, находящегося в электролите, возникают короткозамкнутые гальванические элементы. Причиной их возникновения является наличие неоднородных внутренних напряжений и деформаций в металле. В процессе электрохимического растворения поверхности металла изменяется её шероховатость.

Отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии поверхности направлены на решение проблем с помощью параметрического описания профиля или поверхности [1-3]. В настоящее время установлено около 20 различных функциональных свойств поверхности, на которые существенно влияет её микрогеометрия (адгезия, электрическая проводимость и т.д.), поэтому необходима оптимизация параметров микрогеометрии поверхности металлических конструкций для этих функциональных свойств [4, 5].

В большинстве стран мира для оценки и контроля профилей поверхности применяют специальные приборы ошупывающего типа, оснащенные в основном индукционными датчиками, – например, профилометр модели 130.

Цель исследований: провести кратномасштабный вейвлет-анализ шероховатости поверхности металла.

Материалы и методы. Профилометр 130 – измерительный прибор, предназначенный для измерений параметров профиля и шероховатости поверхности образца по системе средней линии. Замеры производятся в строгом соответствии с ГОСТ 25142-82.

Внешний вид профилометра модели 130 представлен на рисунке 1.

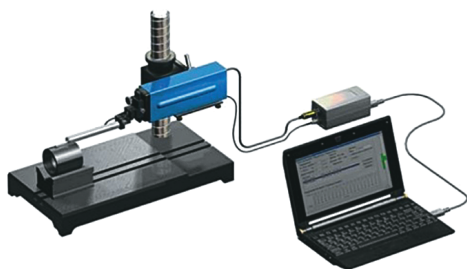


Рис. 1. Внешний вид профилометра модели 130

Fig. 1. Appearance of the profilometer model 130

Действие профилометра основано на принципе ошупывания неровностей измеряемой поверхности щупом индуктивного датчика – алмазной иглой в процессе

трассирования (перемещения датчика вдоль измеряемой поверхности с постоянной скоростью), преобразования высоты щупа в цифровой сигнал с дальнейшей обработкой.

Параметры шероховатости вычисляются согласно ГОСТ 2789-73 на определенной базовой длине.

Исследуемый сигнал – профилограмма, представляющая собой дискретный ряд $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$, мкм, значений пиков и впадин рельефа поверхности металлической пластины. Одномерные сигналы содержат 1024 отсчёта с длиной базовой линии $L = 1,9$ мм. С помощью профилометра записывается профиль поверхности металлических образцов. В течение 1 сек. алмазная игла профилометра проходит 1 мм по поверхности образца, записывая новое значение через каждые 0,5 мкм с частотой дискретизации 1000 Гц. В качестве исследуемого материала использовалась малоуглеродистая холоднокатаная сталь 08kp, из которой изготавливаются тонколистовые конструкции сельскохозяйственной техники. Поверхность образцов была отшлифована, при этом шероховатость поверхности составила $R_a = 0,22$ мкм (среднее арифметическое отклонение профиля). Анализ шероховатости поверхности проводился в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с помощью профилометра модели 130.

Результаты и их обсуждение. Для оценки микрогеометрии поверхности применён вейвлет-анализ. Достоинством дискретного одномерного вейвлет-преобразования является наличие эффективных алгоритмов, позволяющих проводить оценку микрогеометрии поверхности с помощью ЭВМ. Сигнал представляется в виде последовательных приближений. Выделяются составляющие сигнала: тренд, циклические компоненты, локальные особенности (флуктуации) вокруг составляющих сигнала.

Вейвлеты применяются для анализа и обработки нестационарных во времени или неоднородных в пространстве сигналов. Сигнал характеризуется его средним значением (трендом) и колебаниями около него. При обработке данных представляют интерес функции на разных масштабах, поскольку по ним можно определить информацию о природе этих функций.

Для построения базисных функций используются масштабные преобразования и сдвиги. За счёт применения масштабов вейвлеты способны выявить функции сигнала на разных шкалах, а с помощью сдвигов определить свойства сигналов на разных интервалах. Свойство локальности вейвлетов даёт преимущества перед тригонометрическим преобразованием Фурье: синусы и косинусы определены на всей числовой оси, а вейвлеты имеют компактный носитель [6-11].

Вейвлеты образуют базисы пространства функций, интегрируемых с квадратом $L^2(\mathbb{R})$ на конечном интервале. Пример такого базиса построен более века назад – это базис Хаара. Он наиболее подходит для анализа свойств шероховатости поверхностей металлов. Ортонормированный базис Хаара строится на скейлинг-функции $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0; 1); \\ 0, & x \notin [0; 1). \end{cases}$$

Пространство V_j , где $j \in \mathbb{Z}$, порождается системой функций:

$$\varphi_{j,n}(x) = \sqrt{2^j} \varphi(2^j x - n), \quad (1)$$

где $n \in \mathbb{Z}$. Это ортонормированная система функций с носителем

$$\text{supp}(\varphi_{j,n}) = \left[\frac{n}{2^j}, \frac{n+1}{2^j} \right],$$

то есть

$$\varphi_{j,n}^2 = 2^j \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi^2(2^j x - n) dx = 2^j \int_{n/2^j}^{(n+1)/2^j} dx = 1.$$

Пусть V_j – функциональное пространство, порождённое системой функций (1). Имеют место следующие включения:

$$V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_j.$$

В каждом пространстве V_j определен ортонормированный базис $\{\varphi_{j,n}(x)\}$. Линейные комбинации функций вида $\varphi_{j,n}(x)$ являются кусочно-постоянными функциями. Замыкание пространств

$$\overline{\bigcup_{j=0}^{\infty} V_j} = L^2(\mathbb{R}).$$

задаёт пространство Гильберта.

Отметим, что базис следующего пространства V_{j+1} не содержит элементов базиса пространства V_j . Поэтому мы не можем пока из базисов пространств V_j получить базис всего пространства $L^2(\mathbb{R})$.

Для начала рассмотрим пространства V_0 и V_1 . Поскольку V_0 есть замкнутое подпространство V_1 , то существует ортогональное дополнение к V_0 в пространстве V_1 . Обозначим его как W_0 . Тогда имеем ортогональное разложение пространства V_1 :

$$V_1 = V_0 \oplus W_0.$$

Функция $\varphi_{0,n}(x)$ раскладывается по базису $\{\varphi_{1,n}(x)\}$ пространства V_1 :

$$\varphi_{0,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,2n} + \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,2n+1}.$$

Из условия ортогональности $\psi \perp V_0$:

$$(\psi, \varphi_{0,n}) = 0.$$

Для любого $n \in \mathbb{Z}$ найдём функцию

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,0}(x) - \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi_{1,1}(x) = \varphi(2x) - \varphi(2x-1),$$

то есть она задается условиями на соответствующих интервалах:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1/2); \\ -1, & x \in [1/2, 1); \\ 0, & x \notin [0, 1). \end{cases}$$

Функция $\psi(x)$ называется материнским вейвлетом Хаара. Её сдвиги $\psi(x-n)$ формируют базис пространства W_0 . Система функций $\{\varphi_{0,n}(x), \psi_{0,n}(x)\}$, $n \in \mathbb{Z}$ является новым ортонормированным базисом пространства V_1 . Аналогично можно построить базис пространства V_2 :

$$V_2 = V_1 \oplus W_1.$$

Учитывая, что $V_1 = V_0 \oplus W_0$, получаем:

$$V_2 = V_0 \oplus W_0 \oplus W_1.$$

Тогда на $(j+1)$ -м этапе имеем:

$$V_{j+1} = V_0 \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots \oplus W_j,$$

где ортонормированный базис пространства W_j образуют функции вида:

$$\psi_{j,n}(x) = \sqrt{2^j} \varphi(2^j x - n), \quad j, n \in \mathbb{Z}, \quad (2)$$

Функции (2) называются базисными вейвлетами Хаара. Ортонормированный базис пространства $L^2(\mathbb{R})$

$$L^2(\mathbb{R}) = V_0 \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots \oplus W_j \oplus \dots$$

состоит из функций:

$$\{\varphi_{0,n}(x), \psi_{j,n}(x)\}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \in \mathbb{Z}.$$

Предположим, что мы имеем функцию $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ и хотим провести вейвлет-анализ этого сигнала. Если следовать той же схеме, что и при анализе Фурье, то мы должны разложить функцию $f(x)$ по вейвлет-базису (2):

$$f(x) = \sum_{j,n \in \mathbb{Z}} d_{j,n} \psi_{j,n}(x),$$

где

$$d_{j,n} = (f, \psi_{j,n}) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\psi_{j,n}(x)} dx.$$

Затем следует проанализировать коэффициенты разложения $\{d_{j,n}\}$. Но поскольку качественный смысл коэффициентов $d_{j,n}$ в отличие от фурье-коэффициентов представляется неясным, при вейвлет-анализе используется другой подход, состоящий из двух основных этапов [12]:

1. Для начала выберем приближение функции $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$ в некотором пространстве V_j , спроецировав функцию $f(x)$ на пространство V_j :

$$P_j : L(\) \rightarrow V_j, \quad f(x) \rightarrow P_j(f) \in V_j.$$

Оператор проецирования P_j в базисе $\{\varphi_{j,n}(x), n \in \mathbb{Z}\}$ имеет вид:

$$P_j(f) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} (f, \varphi_{j,n}) \varphi_{j,n}(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_{j,n} \varphi_{j,n}(x).$$

Обозначим символом cA_o набор коэффициентов разложения:

$$cA_o = \{a_{j,n}\},$$

$$a_{j,n} = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\varphi_{j,n}(x)} dx.$$

2. Подпространство V_j разложим в прямую сумму ортогональных подпространств:

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1}.$$

Это позволяет j -е приближение $P_j(f)$ представить в виде суммы:

$$P_j(f) = P_{j-1}(f) + P_{j-1}^W(f).$$

В базисах пространств V_{j-1} и W_{j-1} получаем:

$$P_j(f) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j-1,k} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x),$$

где $a_{j-1,k}$ – коэффициенты аппроксимации $(j-1)$ -го уровня разрешения

$$a_{j-1,k} = (f, \varphi_{j-1,k}) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\varphi_{j-1,k}(x)} dx;$$

$d_{j-1,k}$ – детализирующие коэффициенты

$$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int_{\mathbb{R}} f(x) \overline{\psi_{j-1,k}(x)} dx.$$

Обозначим полученные наборы коэффициентов символами cA_1 и cD_1 :

$$cA_1 = \{a_{j-1,k}\}, \quad cD_1 = \{d_{j-1,k}\}.$$

Коэффициенты cA_1 описывают более грубое приближение функции $f(x)$ в пространстве V_{j-1} , а коэффициенты cD_1 характеризуют детали, которыми начальное приближение $P_j(f)$ отличается от $P_{j-1}(f)$. Далее массив cA_1 можно ещё раз разложить на более грубую часть $P_{j-2}(f)$ и детализирующую $P_{j-2}^W(f)$:

$$P_j(f) = P_{j-2}(f) + P_{j-2}^W(f) + P_{j-1}^W(f);$$

$$P_j(f) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j-2,k} \varphi_{j-2,k}(x) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j-2,k} \psi_{j-2,k}(x) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x).$$

Таким образом, мы получаем:

$cA_2 = \{a_{j-2,k}\}$ – коэффициенты аппроксимации глубины разложения 2;

$cD_2 = \{d_{j-2,k}\}$ – детализирующие коэффициенты глубины разложения 2;

$cD_1 = \{d_{j-1,k}\}$ – детализирующие коэффициенты глубины разложения 1. Повторяя процедуру N раз, мы получаем вейвлет-разложение $P_j(f)$ в виде серии коэффициентов:

$$P_j(f) = \{cA_N, cD_N, cD_{N-1}, \dots, cD_1\}.$$

Графически вейвлет-разложение можно изобразить в форме диаграммы:

$$\begin{matrix} V_j \rightarrow V_{j-1} \rightarrow V_{j-2} \rightarrow \dots \rightarrow V_{j-N+1} \rightarrow V_{j-N} \\ \searrow W_{j-1} \searrow W_{j-2} \searrow \dots \searrow W_{j-N} \end{matrix}$$

На уровне вейвлет-коэффициентов $P_j(f) = cA_0 \rightarrow \rightarrow \{cA_1, cD_1\} \rightarrow \{cA_2, cD_2, cD_1\} \rightarrow \dots \rightarrow \{cA_N, cD_N, cD_{N-1}, \dots, cD_1\}$ представим разложение сигнала в форме диаграммы:

$$\begin{matrix} P_j(f) \rightarrow cA_1 \rightarrow cA_2 \rightarrow \dots \rightarrow cA_{N-1} \rightarrow cA_N \\ \searrow cD_1 \searrow cD_2 \searrow \dots \searrow cD_N \end{matrix}$$

Вейвлет-преобразованием функции $f(x)$ называется нахождение коэффициентов вейвлет-разложения:

$$\{cA_N, cD_N, cD_{N-1}, \dots, cD_1\}.$$

Кратномасштабный анализ состоит из следующих шагов [12, 13]:

1. Выбираем уровень разрешения j – такой, что аппроксимация $P_j(f)$ достаточно точно описывает функцию $f(x)$.
2. Выбираем глубину разложения N и находим коэффициенты разложения $\{cA_N, cD_N, cD_{N-1}, \dots, cD_1\}$.
3. Анализируем эти коэффициенты.
4. Восстанавливаем функцию $f(x)$, используя найденные коэффициенты разложения: $f(x) \approx \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_{j-N,k} \varphi_{j-N,k}(x) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j-N,k} \psi_{j-N,k}(x) + \dots + \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(x)$.

Проведём анализ профилограммы поверхности металла (рис. 2).

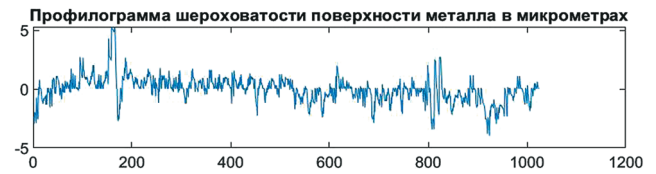


Рис. 2. Профилограмма шероховатости поверхности металла

Fig.2. Metal surface roughness profilogram

Разложение сигнала до 9-го уровня представлено на рисунке 3.

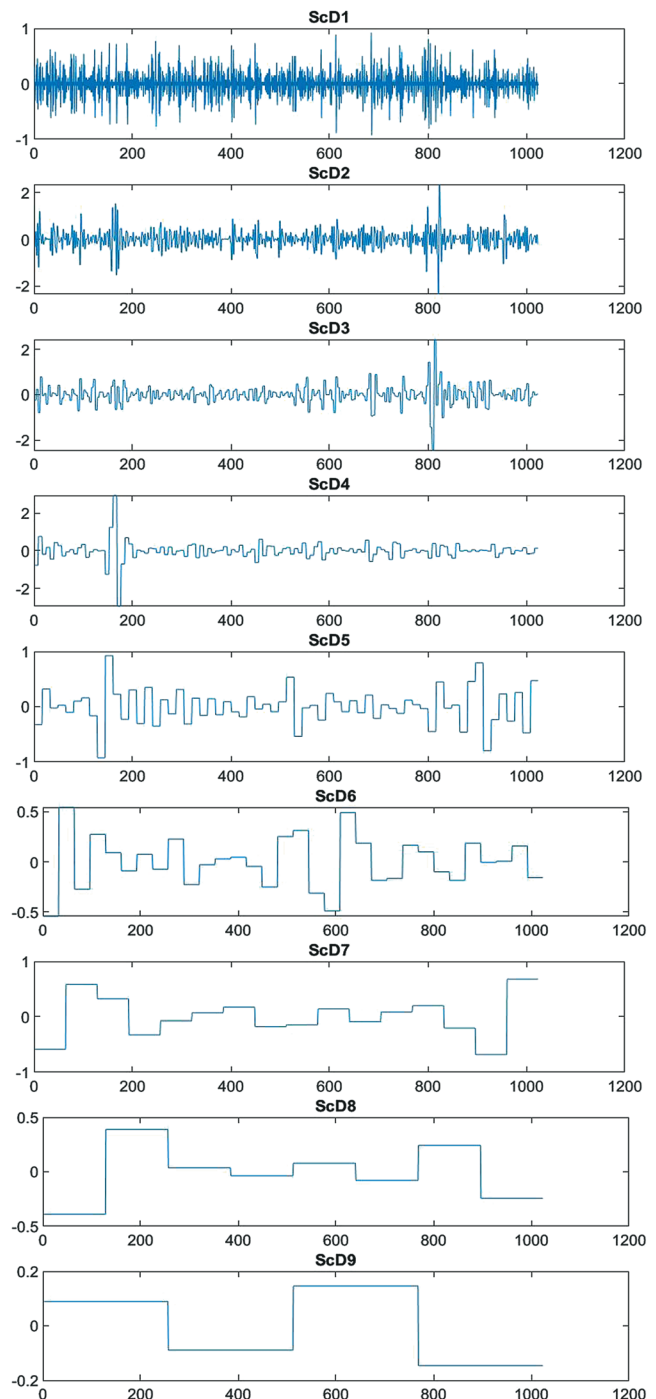


Рис. 3. Разложение сигнала до 9-го уровня

Fig. 3. Decomposition of the signal up to the 9th level

Восстановленные детализирующие коэффициенты (верхние графики рисунка 3) представляют собой высокочастотные флуктуации. Восстановленные детализирующие коэффициенты (нижние графики рисунка 3) представляют собой низкочастотные флуктуации.

Список использованных источников

1. Мусалимов В.М., Замоуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink/Simmechanics). СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 114 с. EDN: VLVDAN.
2. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с. EDN: VBZFLV.
3. Нefeldкин А.И., Одинокова И.В., Гаевский В.В. Исследование влияния геометрических параметров абразивных зерен хонинговальных брусков на микрогеометрию поверхности деталей // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 56-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>
4. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Naji najm A.F., Alipichev A.Yu., Pikina A.M. Use of the selective transfer mechanism in movable couplings used in power transmissions of agricultural machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022; 24 (2): 52-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-52-58>
5. Пучин Е.А., Гайдар С.М. Применение молекулярной инженерии для повышения ресурса сельскохозяйственной техники // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2010. № 2 (41). С. 101-106. EDN: NGFBGD.
6. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.
7. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Хаотическая и регулярная динамика», 2001. 461 с.
8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145-1170. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145>
9. Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Степанов Р.А. Вейвлет-анализ пространственно-временной структуры физических полей // Успехи физических наук. 2022. Т. 192, № 1. С. 69-99. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.10.038859>
10. Дремлин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 171, № 5. С. 465-501. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465>
11. Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Макаров В.А., Овчинников А.А. Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 9. С. 905-939. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201209a.0905>
12. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. Издательство «ДМК Пресс», 2014. 628 с.
13. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.

Критерии авторства

Гайдар С.М., Павлов А.Е., Пикина А.М., Ветрова С.М. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Гайдар С.М., Павлов А.Е., Пикина А.М., Ветрова С.М. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.09.2022

Одобрена после рецензирования 30.09.2022

Принята к публикации 30.09.2022

Выводы

Кратномасштабный вейвлет-анализ позволил определить шероховатость поверхности стали 08кп. Разложение сигнала до 9-го уровня с помощью каскадного алгоритма вычислений выявило, что восстановленные детализирующие коэффициенты представляют собой высокочастотные и низкочастотные флуктуации. В дальнейшем это позволит проводить оценку усталостной прочности металлических конструкций.

References

1. Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I., Perechesova A.D., Nuzhdin K.A. Modeling of mechatronic systems in the MATLAB environment (Simulink/Simmechanics) [Modelirovaniye mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink/ Simmechanics)]. St. Petersburg, NRU ITMO, 2013. 114 p.
2. Musalimov V.M., Valetov V.A. Dynamics of frictional interaction [Dinamika friktsionnogo vzaimodeystviya]. St. Petersburg, SPbGU ITMO, 2006. 191 p.
3. Nefedkin A.I., Odinkova I.V., Gaevsky V.V. Investigation of the influence of the geometric parameters of abrasive grains of honing stones on the microgeometry of the surface of parts [Issledovaniye vliyaniya geometricheskikh parametrov abrazivnykh zeren khoningoval'nykh bruskov na mikrogeometriyu poverkhnosti detaley]. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022; 24(3): 56-63. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-56-63>
4. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Najinajm A.F., Alipichev A.Yu., Pikina A.M. Use of the selective transfer mechanism in movable couplings used in power transmissions of agricultural machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022; 24(2): 52-58. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-52-58>
5. Puchin E.A., Gaidar S.M. The use of molecular engineering to increase the resource of agricultural machinery [Primeneniye molekulyarnoy inzhenerii dlya povysheniya resursa sel'skokhozyaystvennoy tekhniki]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2010; 2 (41): 101-106.
6. Chui K. Introduction to wavelets [Vvedeniye v veyvlety]. Moscow, Mir, 2001. 412 p.
7. Dobeshi I. Ten lectures on wavelets [Desyat' lektsiy po veyvletam]. Izhevsk, Research Center "Chaos and Regular Dynamics", 2001. 461 p.
8. Astafieva N.M. Wavelet analysis: fundamentals of theory and examples of application [Veyvlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniya]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1996; 166(11): 1145-1170. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145>
9. Frik P.G., Sokolov D.D., Stepanov R.A. Wavelet analysis of the space-time structure of physical fields [Veyvlet-analiz prostranstvenno-vremennoy struktury fizicheskikh poley]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2022; 192(1): 69-99. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.10.038859>
10. Dremelin I.M., Ivanov O.V., Nechitailo V.A. Wavelets and their use [Veyvlety i ikh ispol'zovaniye]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2001; 171(5): 465-501. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200105a.0465>
11. Pavlov A.N., Khramov A.E., Koronovskii A.A., Sitnikova E.Yu., Makarov V.A., Ovchinnikov A.A. Wavelet analysis in neurodynamics [Veyvlet-analiz v neyrodinamike]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2012; 182(9): 905-939. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201209a.0905>
12. Smolentsev N.K. Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB [Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB]. Moscow, DMK Press, 2014. 628 p.
13. Malla S. Wavelets in signal processing [Veyvlety v obrabotke signalov]. Moscow, Mir, 2005. 671 p.

Contribution

S.M. Gaidar, A.E. Pavlov, A.M. Pikina and S.M. Vetrova performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. S.M. Gaidar, A.E. Pavlov, A.M. Pikina, and S.M. Vetrova have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 21.09.2022

Approved after reviewing 30.09.2022

Accepted for publication 30.09.2022