

УДК 621.9.044

Е.В. Басова

**ОПИСАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ, ОБРАБОТАННОЙ МЕТОДОМ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
Харьков (Украина)

Получил дальнейшее развитие метод оценки шероховатости поверхности, обработанной по технологии высокоскоростного фрезерования, на базе интегрального функционала качества с учетом деформационных процессов в материале. Показано, что для оценки шероховатости фрезерованной поверхности требуется использование параметра Rg^2 , а текстуру такой поверхности можно описать с помощью wavelet-функции, поскольку шероховатость поверхности приобретает случайный характер.

Ключевые слова: шероховатость, высокоскоростное фрезерование, концевая фреза, интегральный функционал качества, деформация, wavelet-анализ.

Современное производство развивается в рамках цифровых технологий и характеризуется повышением требований к качеству изготовления машиностроительной продукции. Из анализа наиболее современных и перспективных тенденций развития методов металлообработки установлено, что минимальное значения шероховатости поверхности детали можно ожидать от применения высокоскоростной обработки (ВСО) [1]. Однако использование ВСО требует как овладения технологией в целом, так и изучения механизма формирования качественных характеристик нарушенного слоя после ее применения. Одной из основных характеристик процесса высокоскоростной лезвийной обработки является именно шероховатость обработанной поверхности. В качестве основного критерия оценки шероховатости принято использовать среднеарифметическое отклонение профиля Ra , однако, профессор Добротворский С.С. в 1996 г. доказал, что такой параметрический подход не способен полноценно оценить картину распределения шероховатости шлифованных поверхностей, и предложил использование параметра Rg (среднеквадратического отклонения профиля) [2]. Рассмотрим подход оценки шероховатости поверхности, обработанной по технологии высокоскоростного фрезерования концевыми сферическими фрезами с использованием результатов профессора Добротворского С.С.

Целью статьи является изучение механизма формирования и описание шероховатости поверхности обработанной методом ВСО концевыми фрезами.

В процессе применения ВСО различных материалов актуальным является не только обеспечение низкой шероховатости обработанных поверхностей, но и стабильность полученного результата. Решение этой задачи возможно при глубоком понимании, изучении и мониторинге процессов и явлений, протекающих при резании и формировании поверхностных характеристик. Специфика технологии ВСО позволяет говорить об ограниченности применения традиционных знаний о процессе фрезерования при назначении режимов резания для обеспечения оптимальных параметров шероховатости поверхностей деталей. В связи с этим авторами работы [3] был проведен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, позволивший получить краткую характеристику факторов, влияющих на шероховатость обработанной поверхности при ВСО.

Результаты анализа позволили сформулировать интегральный функционал шероховатости поверхности, обработанной концевым высокоскоростным фрезерованием. Разработанный функционал по своей сути являлся отображением влияния геометрических составляющих технологического процесса обработки на среднеарифметическое отклонение профиля поверхности. Ранжирование параметров такого функционала дает возможность обоснованно

выбрать условия обработки для получения минимального значения параметра R_a . Дальнейшие исследования особенностей формирования шероховатости поверхностей, обработанных с применением технологии высокоскоростного фрезерования (ВСФ) концевыми фрезами, дали основание полагать, что, помимо геометрической составляющей процесса механообработки, на формирование поверхностной текстуры влияют еще и деформационные процессы в зоне обработки. Так как применение технологии ВСФ, в отличие от обработки с традиционными скоростями резания, порождает задачи изучения и учета механизма тепловыделения в зоне резания, внутреннего трения частиц металла в стружке и в зоне пластического деформирования, а также давление на инструмент в процессе ВСФ (рис. 1).



Рис. 1. Сводная структурная схема факторов, влияющих на качество обрабатываемой поверхности (на базе схемы Бернардоса, Воснякоса [4])

Известно, что при фрезеровании концевыми сферическими фрезами величины продольной и поперечной шероховатости поверхности сильно отличаются. Величина поперечной шероховатости ($R_{a\text{попереч}}$) может превышать значение продольной ($R_{a\text{продол.}}$) в несколько раз, что объясняется наличием остаточных гребешков между соседними проходами фрезы. В этом случае использование параметра R_a для оценки шероховатости обработанной поверхности является недостаточным, так как он не способен отразить истинное распределение шероховатости по поверхности. Тогда необходимо использовать параметр, способный отразить как периодические, так и случайные составляющие распределения шероховатости обработанной поверхности. Такому условию соответствует квадратичный интегральный функционал R_g .

В работе профессора Добротворского С.С. [2] рассмотрены процессы формирования продольной и поперечной шероховатости при шлифовании инструментом из сверхтвердых материалов. Им установлено, что шероховатость в поперечном и продольном направлениях можно оценить квадратичным отклонением профиля, что позволяет учитывать как периодические, так и случайные составляющие шероховатости шлифованной поверхности с нормальным распределением амплитуд. В этом случае шероховатость поверхности рассматривалась в пределе как сигнал белого шума, который состоит из периодических, случайных составляющих и их произведения (суперпозиции). Такой подход решает задачу описания шероховатости поверхности, используя обратное преобразование Лапласа, а для принятия пра-

вильного решения – критерий Пирсона. На основании этого можно говорить, что равенство R_a в продольном и поперечном направлениях является доказательством того, что поверхность после высокоскоростного фрезерования концевыми сферическими фрезами по своей шероховатости стремится к поверхности, характерной для шлифования, однако для ее достаточного описания необходимо использовать квадратичный функционал.

Дальнейшее развитие этого подхода возможно именно за счет учета деформационной составляющей процесса лезвийной обработки, которую в работе [1] предлагается учитывать в виде угла наклона нормали фрезы и угла наклона стружкоотводной канавки инструмента при реализации технологии ВСФ (рис. 1). Необходимо отметить, что величина деформационной составляющей зависит от твердости обрабатываемого материала. Для усиления деформационной составляющей, а следовательно, и уменьшения шероховатости обработанной поверхности в работе [1] предложена технология ВСФ с половинным перекрытием, суть которой заключается в том, что после проведения строчной обработки поверхность обрабатывается по эквидистантной траектории с половинным шагом (рис. 2).

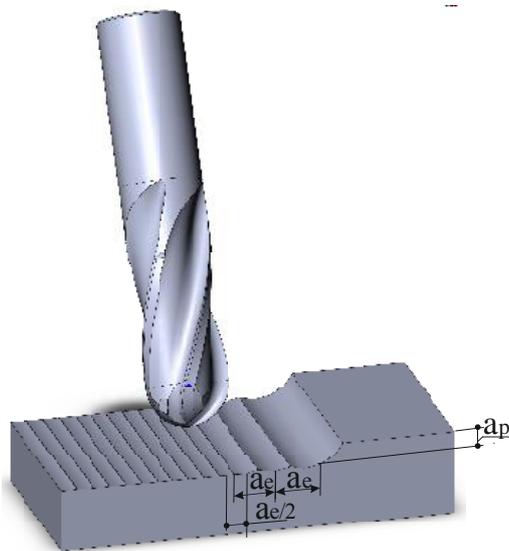


Рис. 2. Технология ВСФ строчной обработки с половинным перекрытием:
 a_p – глубина резания (мм); a_e – ширина между соседними проходами фрезы (мм)

Изложенные результаты дали основание для доработки интегрального функционала шероховатости обработанной поверхности, представленного в работе [3], с учетом не только геометрической составляющей процесса механообработки, но и с учетом деформационной составляющей. В качестве деформационной составляющей предложено учесть угол наклона нормали режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности и угол наклона спирали стружкоотводной канавки фрезы [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_g^\Sigma = \int (R, a_p, S, V_{рез}, V_{деф}, i, \angle N) dt \rightarrow \min \\ 0^\circ \leq i < 90^\circ \\ 0^\circ < \angle N < 90^\circ \rightarrow \text{optimal (ooptima= } 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ \text{ в зависимости от условий обработки)} \end{array} \right. \quad (1)$$

где R – радиус сферической части концевой фрезы (мм); a_p – глубина резания (мм); S – подача (мм/мин); $V_{рез}$ – скорость резания (м/мин); $V_{деф}$ – скорость деформации (c^{-1}); $\angle N$ – угол наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности; i – угол наклона стружкоотводной канавки инструмента.

Минимизацию данного функционала можно осуществить методом профессора Тагучи или методом, предложенным профессором Добротворским С.С., в зависимости от реальных

условий обработки, что позволит ранжировать параметры и контролировать качество обрабатываемой поверхности путём корректировки входных параметров. Оба метода базируются на рассмотрении разных уровней соотношения сигнал-шум для принятия правильных решений. Однако выполнить многокритериальную оптимизацию функционала достаточно сложно, так как метод, предложенный Доброворским С.С., не позволяет осуществить многокритериальную оптимизацию с одновременным учетом семи технологических параметров; метод Тагучи не рассматривает взаимосвязь параметров, а выбирает наиболее существенный, т.е. не отражает физику процесса обработки. Поэтому оптимальным решением выполнения многокритериальной оптимизации интегрального функционала качества является моделирование процесса обработки на базе метода конечных элементов. Для усиления деформационной составляющей процесса обработки необходима разработка новой технологии со сложными траекториями перемещения режущего инструмента. Анализ параметров функционала показал, что по мере увеличения скорости резания при ВСО вклад геометрических параметров в интегральный функционал качества обработанной поверхности методом ВСФ концевым сферическим инструментом должна уменьшаться и возрастет роль деформационных процессов [1]. В случае придания инструменту сложной траектории движения фрезерованная поверхность по своим параметрам должна стремиться к поверхности, характерной для шлифования, т.е. иметь случайный характер.

Исследования текстуры поверхности, обработанной с применением технологии ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента, проводили с применением wavelet-анализа (рис. 3). Были проведены ряд исследований, которые позволили определить предельные частоты срезов фильтров, что дало возможность отделить шероховатость сложнопрофильной поверхности от волнистости и профиля. Задачу разделения сигнала на каналы решали с применением wavelet-преобразования в качестве набора фильтров.

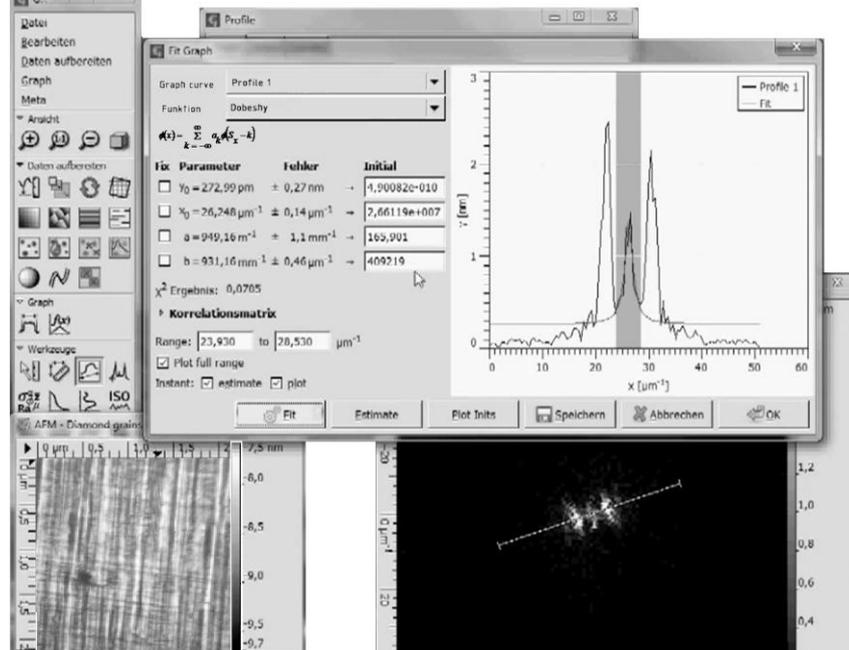
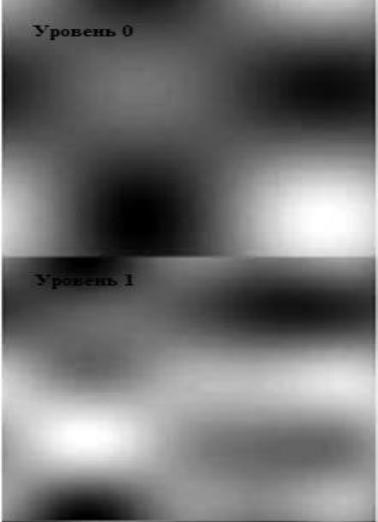
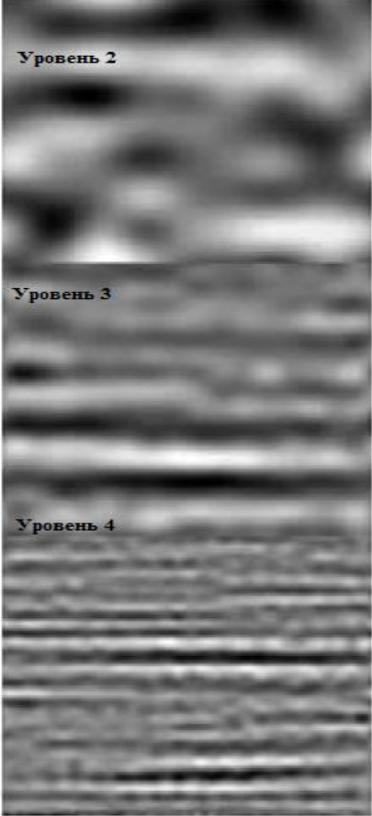
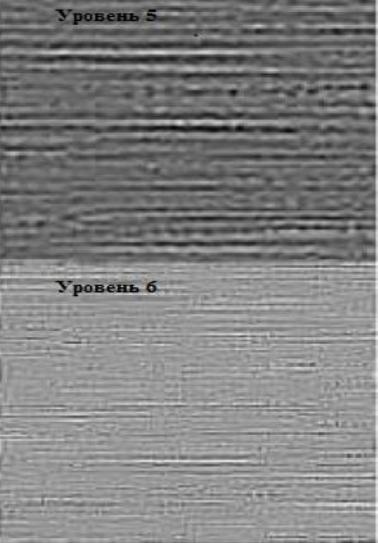
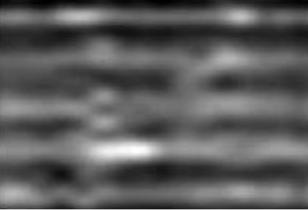
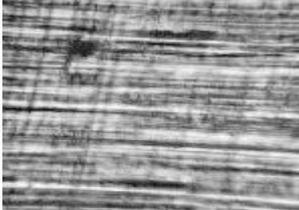
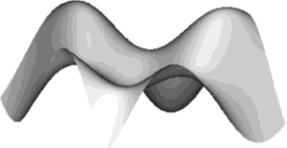
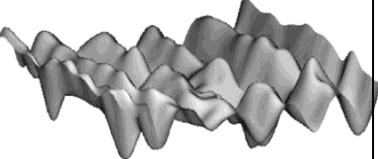
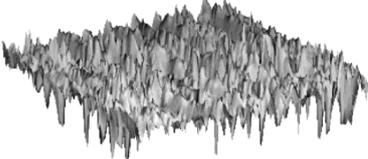


Рис. 3. Разложение поверхности на каналы посредством wavelet Добеши порядка 20 в среде пакета Gwyddion

Фильтрация профилограммы и изображения поверхности после ВСФ на первом этапе позволила получить уровневое разложение обработанной поверхности. На втором этапе оценки шероховатости удалось получить пространственное отображение шероховатости, волнистости и профиля поверхности (табл. 1).

Таблица 1

Многомасштабное разложение изображения поверхности

Фильтры для отделения профиля	Фильтры для отделения волнистости	Фильтры для отделения шероховатости
Многоуровневое разложение		
		
Наложение уровней для отделения составляющих поверхности		
		
Оценка текстуры поверхности		
 <p data-bbox="288 1686 464 1715">Ra=0,056 мкм</p>	 <p data-bbox="722 1686 898 1715">Ra=0,012 мкм</p>	 <p data-bbox="1129 1686 1305 1715">Ra=0,011 мкм</p>

Выводы

В результате исследований установлено, что на формирование шероховатости поверхности, обработанной методом высокоскоростного фрезерования, влияют две составляющие процесса механообработки: геометрическая и деформационная. Сама же фрезерованная поверхность, после применения технологии ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента, соответствует по характеристикам шлифованной и является случайным процессом распределения амплитуд как в продольном, так и поперечном направлении ($Ra_{\text{попереч}} = Ra_{\text{прод}} = 0,011$ мкм) (табл. 1). Шероховатость такой поверхности является процессом с

нормальным распределением амплитуд, которую с точки зрения пространственной оценки перспективно описывать параметром R_g^2 . Так как квадратичный интегральный функционал, в отличие от традиционных методов оценки шероховатости среднеарифметическим отклонением профиля (R_a) и высотой неровностей профиля по десяти точкам (R_z), позволяет детально описать профиль шероховатости поверхности в одном сечении.

Описание профиля шероховатости всей поверхности с помощью разработанного интегрального функционала качества является достаточно сложной проблемой. Задача оценки величины шероховатости сложных криволинейных поверхностей является еще более сложной. Использование современного математического аппарата с применением wavelet-функций позволяет отделить кривизну обрабатываемой поверхности от параметров шероховатости. Текстура поверхности после ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента в пределе стремится к текстуре, характерной для шлифованной поверхности, что подтверждает правильность учета в интегральном функционале качества деформационной составляющей процесса обработки.

Библиографический список

1. **Басова, Е.В.** Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с.
2. **Добротворський, С.С.** Наукові основи процесу лазерної правки шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів : автореферат дисс. ... доктора технічних наук : 05.03.07 / Сергій Семенович Добротворський. – Київ, 1996. – 37 с.
3. **Добротворский, С.С.** Разработка интегрального функционала качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании / С.С. Добротворский, Е.В. Басова // Вісник інженерної академії України. – К., 2011. №3. С. 125–130.
4. **Benardos, P.O.** Predicting surface roughness in machining: a review / P.O. Benardos, G.C. Vosniakos // International Journal of machine Tools and Manufacture. 2003. №43. P. 833–844.

Дата поступления
в редакцию 09.02.2015

E.V. Basova

DESCRIPTION SURFACE ROUGHNESS TREATED BY HIGH-SPEED MILLING

National technical university «Kharkov polytechnic institute», Kharkov (Ukraine)

Purpose: Study of the source mechanism and description of surface roughness treated by *high speed ball milling*.

Method: Theoretical studies based on scientific foundations of engineering technology, theoretical mechanics and cutting, digital signal processing in the program Gwyddion in the study of profilograms complex surfaces.

Results: In order further developed method for estimating surface roughness treated by high-speed milling technology, on the basis of an integral functional quality with the deformation processes in the material. The study shown that the evaluation requires the use of roughness parameter R_g^2 , and the texture of a surface can be described using wavelet-function, since the surface roughness becomes random.

Application domain: The presented results allow getting an accurate description of surface roughness based on random and periodic components. The article can be useful for students, teachers, engineers and other specialists of engineering and aircraft construction enterprises.

Key words: roughness, high-speed milling, end mill, integral functional quality, deformation, wavelet-analysis.