

УДК 621.9.015
DOI 10.17513/snt.39729

ОСОБЕННОСТИ МИКРОРЕЛЬЕФА ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

¹Кузнецова Е.М., ²Овсянников В.Е., ²Ковенский И.М., ²Некрасов Р.Ю.

¹ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», Курган, e-mail: lenkuz@bk.ru;
²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: vik9800@mail.ru

В данной статье рассмотрены вопросы изучения особенностей формирования профиля шероховатости поверхности при токарной обработке конструкционных сталей, которые подвергнуты закалке. В качестве метода обработки рассматривается чистовое точение. Обрабатываемые материалы – углеродистые и низколегированные стали марок 45 и 45Х с твердостью до 42HRC. Микро рельеф обработанной поверхности является результатом воздействия многих факторов, основными среди которых являются геометрия и кинематика процесса формообразования, параметры режущего инструмента (например, шероховатость рабочей поверхности, радиус при вершине резца и т.д.), деформационные процессы (как упругого, так и пластического характера), а также вибрации технологической системы. Из перечисленного выше видно, что часть из факторов можно условно отнести к детерминированным (например, кинематику процесса), а часть – к случайным (вибрации технологической системы). В рамках данной работы используется кибернетический подход к исследованию шероховатости поверхности, который предполагает, что микро рельеф обработанной поверхности является результатом суммарного влияния как детерминированных, так и случайных факторов. Исследование составляющих выполнялось на основе использования корреляционного и фрактального анализа. Для расчетов применялось оригинальное программное обеспечение. В результате расчетов было установлено, что для чистового точения закаленных сталей в микро рельефе преобладает случайная компонента, причем чем шероховатость меньше, тем доля случайной компоненты выше. Показано, что создание условий, которые снижают вибрации, позволяет существенно улучшить качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: шероховатость, формирование, микро рельеф, анализ, составляющие

FEATURES OF ROUGHNESS MICRORELIEF DURING TURNING OF HARDENED STEELS

¹Kuznetsova E.M., ²Ovsyannikov V.E., ²Kovenskiy I.M., ²Nekrasov R.Yu.

¹Kurgan State University, Kurgan, e-mail: lenkuz@bk.ru;
²Tyumen Industrial University, Tyumen, e-mail: vik9800@mail.ru

This article discusses the issues of studying the features of forming a surface roughness profile during turning of structural steels that have been quenched. Finishing turning is considered as a treatment method. Treated materials are carbon and low-alloy steels of grades 45 and 45Kh with hardness up to 42HRC. The microrelief of the treated surface is the result of many factors, the main among which are the geometry and kinematics of the forming process, the parameters of the cutting tool (for example, the roughness of the working surface, the radius at the tip of the cutter, etc.), deformation processes (of both elastic and plastic nature), as well as vibrations of the technological system. This work uses a cybernetic approach to the study of surface roughness, which assumes that the microrelief of the treated surface is the result of the combined influence of both deterministic and random factors. In the work, the study of the components was carried out on the basis of the use of correlation and fractal analysis. Original software was used for calculations. As a result of the calculations, it was found that for the final turning of hardened steels, a random component prevails in the microrelief, and the roughness is less, the proportion of the random component is higher. It has been shown that the creation of conditions that reduce vibrations makes it possible to significantly improve the quality of the treated surface.

Keywords: roughness, formation, microrelief, analysis, components

Первоначально для описания процесса формирования шероховатости поверхности при токарной обработке использовался подход, при котором предполагалось, что обработанный профиль является регулярной кривой, образующейся вследствие совокупности кинематических движений при точении. Расчетная формула для определения величины среднеарифметического отклонения профиля была предложена В.Л. Чебышевым и имеет вид

$$Rz = S^2 / (8 \times r), \quad (1)$$

где S – величина продольной подачи; r – радиус при вершине инструмента.

Позднее было установлено, что процесс более сложный и надо учитывать не только геометрию и кинематику процесса, но и характеристики срезаемого слоя, что было предложено А.И. Исаевым [1, с. 51]:

$$Rz = \frac{S}{8 \times r} + \frac{h_{\min}}{2} \times \left(1 + \frac{r \times h_{\min}}{S^2} \right), \quad (2)$$

где h_{\min} – минимальная величина толщины срезаемого слоя.

Дальнейшее развитие представлений о процессе формирования шероховатости поверхности было сформировано научной школой под руководством А.Г. Суслова [2]:

- вырывы обработанного металла с поверхности детали, вызванные адгезионным трением;
- наличие упругих и пластических деформаций;
- форма режущего инструмента;
- шероховатость режущей кромки инструмента;
- кинематика процесса резания;
- вибрации элементов технологической системы.

Зависимость, которая учитывает влияние данных факторов, была предложена в работах научной школы под руководством А.Г. Суслова и имеет вид [2]:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (3)$$

где h_1 – высотная составляющая профиля обработанной поверхности, которая порождена кинематикой резания и геометрическими параметрами режущей части инструмента. Анализируя природу данных факторов, можно сказать, что составляющую h_1 можно принять условно постоянной (детерминированной);

h_2 – высотная составляющая профиля обработанной поверхности, которая порождена колебательными процессами изменения силы резания вследствие неравномерности срезаемого слоя, колебаний твердости обрабатываемой поверхности, и т.д. Анализируя природу данных факторов, можно сказать, что составляющую h_2 принимаем переменной (стохастической);

h_3 – высотная составляющая профиля обработанной поверхности, которая порождена пластическими и упругими деформациями элементов технологической обрабатывающей системы. Анализируя природу данных факторов, можно сказать, что составляющую h_3 принимаем переменной (стохастической);

h_4 – высотная составляющая профиля обработанной поверхности, которая образуется вследствие копирования исходных неровностей поверхности режущего инструмента.

Исходя из опыта исследований профилограмм шероховатости поверхности [3; 4, с. 20–25], можно сказать, что данный фактор также относится к постоянным (детерминированным).

Тогда, с учетом того, что конечный микрорельеф обработанной поверхности (рис. 1, в) включает в себя стохастические (рис. 1, б), так и детерминированные элементы (рис. 1, а), можно представить профиль в виде схемы.

Одни из первых исследований по изучению количественного состава микрорельефа поверхностей производились научной школой Ю.Р. Виттенберга [5], где рассматривалось применение теории вероятности и корреляционного анализа для установления уровня случайной составляющей γ , (вызванной прежде всего вибрациями режущего инструмента). Однако в данных работах преимущественно разрабатывался методологический аппарат для исследования, и они выполнялись без привязки к самому технологическому процессу. Поэтому в качестве развития данного направления необходимо изучить особенности микрорельефа в зависимости от требований к качеству поверхности.

Поэтому применение подхода по выделению систематических и случайных составляющих профиля шероховатости поверхности позволяет выявить факторы, которые оказывают наибольшее влияние. Это особенно важно при обработке закаленных сталей. Кроме того, из закаленных сталей чаще всего изготавливаются ответственные детали, к исполнительным поверхностям которых предъявляются повышенные требования, в том числе и по шероховатости поверхности. При этом использование шлифования для финишной обработки таких деталей также не всегда оправдано из-за процесса шаржирования обработанной поверхности, а также случайного характера микрорельефа поверхностей, обработанных шлифованием.

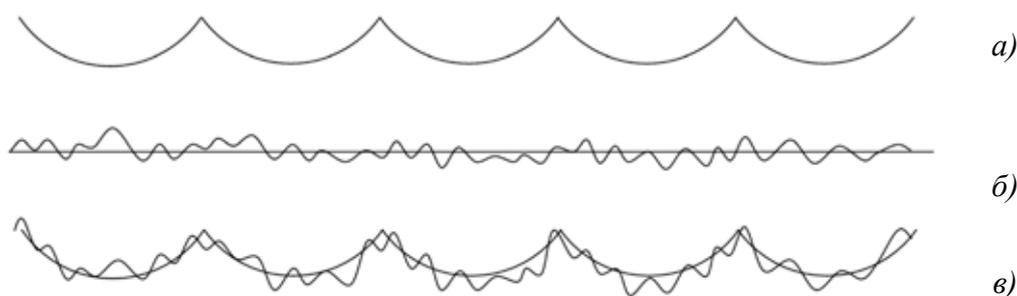


Рис. 1. Схема образования профиля шероховатости поверхности при токарной обработке

Цель исследования – изучение особенностей формирования шероховатости поверхности при токарной обработке закаленных сталей на основе количественного определения уровня систематической и случайной составляющих профиля.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались профилограммы поверхностей, обработанных чистовым точением. В качестве обрабатываемого материала – углеродистые конструкционные, легированные стали с твердостью более 35 HRC: сталь 45 и 45X.

Экспериментальные исследования проводились на токарном обрабатывающем центре с наклонной станиной модели SuperJobber 500.

Режимы испытаний:

- а) пределы скорости резания от 50 до 300 м/мин с постоянной подачей;
- б) пределы подачи от 0,01 до 0,2 мм/об при постоянной скорости резания;
- в) глубина резания от 0,1 до 0,3 мм при постоянных режимах обработки.

Исследование вибраций производили при помощи аппаратуры компании ZetLab: трехкомпонентный датчик вибраций AP20XX (диапазон частот 0–20000 Гц, погрешность, связанная с нелинейностью величин ±4, номер в ГРСИ 88508-23), анализатор спектра Zet 017 (погрешность по определению частоты ±1, номер в ГРСИ 39236-08), АЦП Zet 230 (динамический диапазон частот 100 Дб, частота преобразования 1–100 кГц, Номер в ГРСИ 55763-13, нелинейность преобразования ±1 Дб).

Измерение шероховатости производили при помощи профилографа-профилометра Абрис-ПМ7 (диапазон измерений по Ra 0,4–100 мкм, допустимая погрешность ±5, номер в ГРСИ 19876-00). Средства измерений прошли проверку на предприятии-изготовителе. В качестве режущего инструмента использовались стандартные токарные резцы с механическим креплением режущих пластин из наиболее распространенных в производстве твердых сплавов композит 01 (эльбор), композит 10 (гексанит), ВОК60.

Исследования обработанных профилей производились с использованием теории случайных процессов (на основе корреляционного анализа) [6, с. 51–63; 7], а также на основе фрактальной геометрии [8; 9]. При корреляционном анализе исследуемая профилограмма представляется в виде следующего преобразования:

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_{i=0}^{l-\tau} x(i)x(i+\tau), \quad (4)$$

где τ – параметр по оси абсцисс (физический смысл временная задержка), при-

нимает целые значения $\tau = 0, 1, 2, \dots, \tau_{\max}$; l – длина анализируемой профилограммы; $x(t)$ – значение ординат анализируемого профиля.

Тогда, имея корреляционное преобразование профиля, можно определить искомый уровень случайной компоненты как соотношение дисперсии случайной составляющей D_γ и среднеквадратического отклонения профиля R_q :

$$\gamma = \frac{D_\gamma}{R_q^2}. \quad (5)$$

В свою очередь, составляющие, входящие в выражение (5), можно определить следующим образом:

$$D_\gamma = R_q^2 - 0,5A^2, \quad (6)$$

где $A = \frac{S^2}{8r}$ – высота систематической компоненты профиля.

Среднеквадратическое отклонение профиля можно определить как значение автокорреляционной функции в нулевой точке:

$$R_q = K_{xx}(0). \quad (7)$$

Знание уровня случайной компоненты позволяет оценить долю систематической составляющей β :

$$\beta = 1 - \gamma. \quad (8)$$

Шаг случайной составляющей T_γ профиля определяется как

$$T_\gamma = \frac{T \times T_\beta \times \gamma}{T(1-\gamma) \times T_\beta}, \quad (9)$$

где T – шаг между неровностями реального профиля $T = S_m$; T_β – шаг систематической составляющей $T_\beta = S$; S_m – средний шаг неровностей:

Среднеарифметическое отклонение систематической (Ra_β) и случайной составляющих (Ra_γ) определяется по формулам

$$Ra_\beta = \sqrt{\frac{2}{\pi}} K_\beta(0), \quad (10)$$

$$Ra_\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} K_\gamma(0). \quad (11)$$

Использование фрактальной геометрии также дает возможность получить сведения о степени случайности в анализируемой кривой. Известно, что чем ближе значение фрактальной размерности D [8, 9] к 1,5, тем больше доля случайной составляющей. В данной работе фрактальная

размерность профилограмм поверхностей деталей из закаленных сталей, обработанных точением, оценивалась при помощи показателя Херста (H). Данный показатель определяется по следующей формуле [10, с. 91–96; 11; 12]:

$$H = \log\left(\frac{R}{\sigma}\right) = f(\log(N)), \quad (12)$$

где R и σ – величина размаха и среднеквадратического отклонения профиля, вычисляемая при различных значениях переменной t , которая изменяется в пределах от 1 до $N-1$ (N – длина профилограммы).

Выражения для вычисления R и S имеют вид

$$R_t = \text{Max}(X_{t,N}) - \text{Min}(X_{t,N}), \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (x_i - M_N)^2. \quad (14)$$

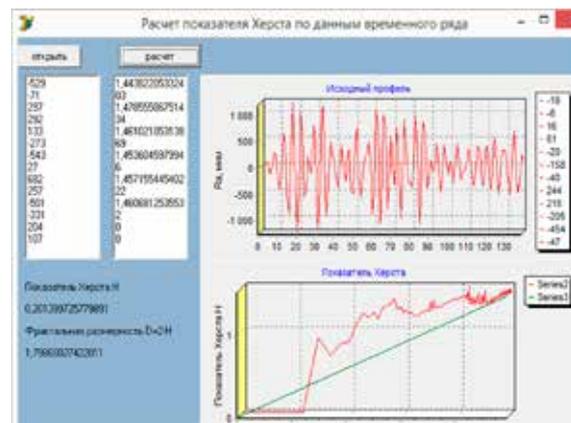
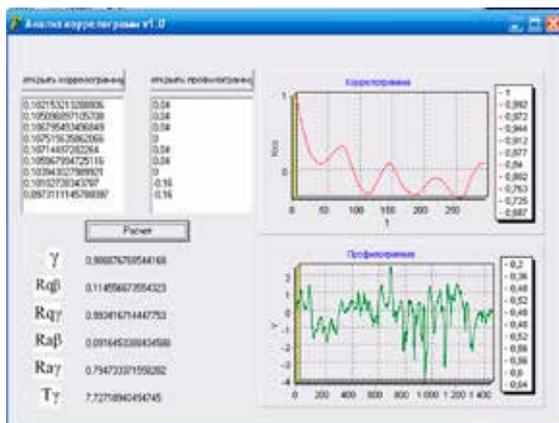


Рис. 2. Прикладное программное обеспечение

Аналитически данная зависимость задается выражением вида

$$\gamma = 1,12301 - 0,25377 \times Ra^3 + 0,73304 \times Ra^2 - 0,72368 \times Ra. \quad (16)$$

Стандартное отклонение: $\sigma = 0,03024$. Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,89945$.

Значение коэффициента детерминации говорит о том, что зависимость (16) можно использовать для описания взаимосвязи между факторами.

На рис. 4 приведена зависимость показателя Херста от среднеарифметического отклонения профиля для поверхностей, обработанных чистовым точением заготовок из закаленных сталей.

Аналитически зависимость имеет следующий вид:

$$H = 0,52733 - 0,0036 \times Ra^3 + 0,02416 \times Ra^2 - 0,12757 \times Ra. \quad (17)$$

Стандартное отклонение: $\sigma = 0,00843$. Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,97513$.

Значение коэффициента детерминации говорит о том, что зависимость (17) адекватна.

На рис. 5 приведены зависимости мощности вибросигнала и шероховатости поверхности, полученные при точении закаленных сталей от ширины фаски износа реза.

При этом показатель Херста и фрактальная размерность связаны между собой следующим соотношением

$$D = 2 - H. \quad (15)$$

Учитывая изложенное выше, можно сказать, что чем ближе величина H к 0,5, тем уровень случайной компоненты в исследуемом профиле выше.

Авторами было разработано прикладное программное обеспечение, которое позволяет в том числе определять значения уровня случайной компоненты по формулам (4)–(11) и показателя Херста по формулам (9)–(15). Интерфейс представлен на рис. 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Была получена зависимость уровня случайной компоненты от среднеарифметического отклонения профиля для поверхностей, обработанных чистовым точением заготовок из закаленных сталей (рис. 3).

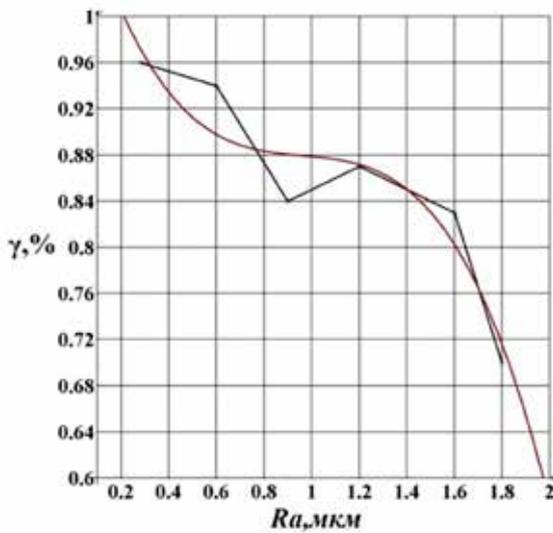


Рис. 3. Зависимость уровня случайной компоненты

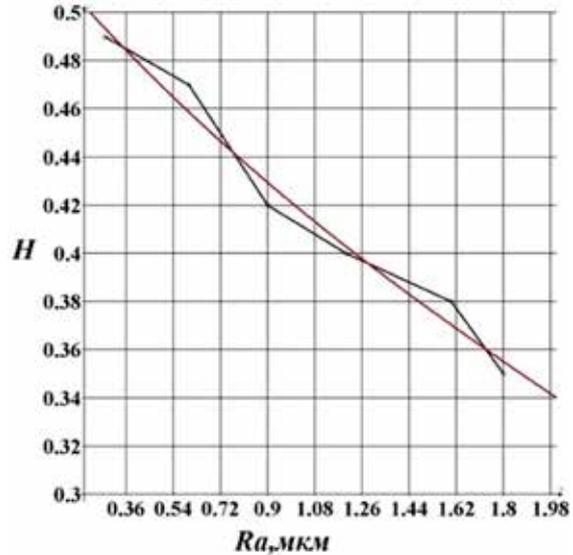


Рис. 4. Зависимость показателя Херста

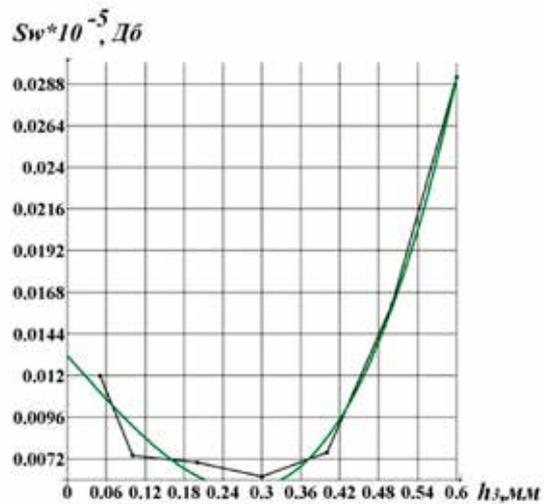
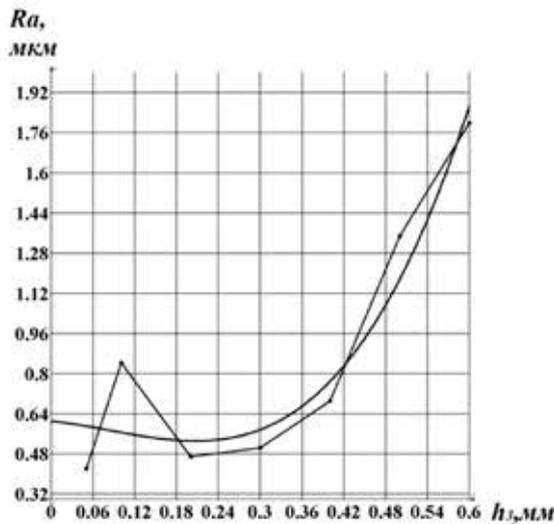


Рис. 5. Зависимости среднеарифметического отклонения профиля (Ra) и мощности вибросигнала (Sw) от ширины фаски износа (h_z)

Было установлено, что коэффициент взаимной корреляции между Sw и Ra составляет 0,94. Также были получены зависимости указанных величин от подачи и скорости резания. Расчеты коэффициента взаимной корреляции показали, что он составляет от 0,86 до 0,95, таким образом, вывод о том, что в формировании шероховатости при обработке закаленных сталей чистовым точением преобладает влияние вибраций, подтверждается.

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в микроре-

льефе поверхностей деталей, которые изготовлены из закаленных сталей и обработаны чистовым точением, преобладает случайная составляющая. Важно отметить, что получилась высокая согласованность результатов, полученных с использованием разных методов исследования. Экспериментальные исследования вибраций и качества обработанной поверхности подтверждают обоснованность выводов теоретических расчетов.

Важным следствием для практики является то, что при уменьшении величины среднеарифметического отклонения профиля (Ra) наблюдается рост уровня случайной компоненты, причем для диапазона, кото-

рый соответствует чистой и финишной обработке ($Ra < 1,6$ мкм), уровень случайной компоненты превышает 75.

Таким образом, при решении задачи обеспечения заданных требований по шероховатости поверхности при токарной обработке необходимо, прежде всего, обеспечить такие условия, которые позволяют минимизировать влияние вибраций.

Список литературы

1. Исаев А.И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке. М.: Машиностроение, 1950. 106 с.
2. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
3. Tomov M., Kuzinovski M. and Cichosz P. Development of mathematical models for surface roughness parameter prediction in turning depending on the process condition // Int. J. Mech. Sci. 2016. No. 113. P. 120–132.
4. Шаповалов В.В., Эрекнов А.Ч., Кохановский В.А. Триботехника: учебник. М.: Феникс, 2017. 351 с.
5. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.
6. Конакова И.П., Пирогова И.И. Шероховатости поверхностей и их практическое применение в программе КОМПАС: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 104 с.
7. Шец С.П., Сакало В.И., Сулов А.Г. Взаимосвязь герметичности подшипниковых узлов трения с абразивным изнашиванием их трибосопряжений // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 36–40.
8. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: БрГУ, 2016. 282 с.
9. Брылкин Ю.В. Создание цифровых моделей рельефа в трехмерном пространстве методами фрактальной геометрии // Графикон 2017: Труды междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. 2017. С. 295–297.
10. Плескунов М.А., Корчемкина Л.В. Теория вероятностей: справочник. Екатеринбург, 2017. 136 с.
11. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Ilyaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // Revista Facultad de Ingeniería. 2022. № 103. С. 88–95.
12. Овсянников В.Е. Применение вейвлет-анализа для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей машин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 56–57.