

**С. Л. ЛЕОНОВ**, д-р техн. наук,  
**В. Д. ГОНЧАРОВ**, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

## **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ**

У статті розглянутий єдиний підхід до розробки імітаційних стохастичних моделей для прогнозування геометричних параметрів якості поверхні деталі на операціях механічної обробки. Показано реалізацію моделей для операцій лезової й абразивної обробки. Результатом моделювання є будь-які параметри шорсткості до побудови гістограм їхнього розподілу.

В статье рассмотрен единый подход к разработке имитационных стохастических моделей для прогнозирования геометрических параметров качества поверхности детали на операциях механической обработки. Показана реализация моделей для операций лезвийной и абразивной обработки. Результатом моделирования являются любые параметры шероховатость вплоть до построения гистограмм их распределения.

In article the uniform approach to development of imitating stochastic models for forecasting geometrical parameters of quality of a surface of a detail for operations of machining is considered. Realization of models for operations cutting and abrasive processing is shown. Result of modeling are any parameters a roughness down to construction of histograms of their distribution.

Геометрические параметры качества поверхности оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей. Случайные колебания параметров технологических систем приводят к нестабильности геометрических показателей качества. При разработке технологических процессов изготовления деталей необходимо учитывать эти особенности, а алгоритмы проектирования операций должны быть адаптированы для учета динамики и стохастических характеристик технологических процессов.

Алгоритмы управления и проектирования технологических процессов должны ориентироваться на имитационное стохастическое моделирование формирования топографии и профиля поверхности детали. Для разработки таких моделей необходимо использовать подход, учитывающий как единые свойства и характеристики процессов механической обработки, так и их особенности, связанные с различной кинематикой и динамикой обработки поверхностей. Реализации методологии ориентированы на создание алгоритмов расчета и моделей таких операций.

Топография поверхности это функция двух аргументов:  $y(l, c)$ , где  $l$  и  $c$  – два взаимно перпендикулярных направления. Обычно эти направления выбирают вдоль и поперек следов обработки, а профилограммы, полученные в этих направлениях, называют продольными и поперечными. Но для получения топографии это не обязательно. Не обязательна даже перпендикулярность направлений  $l$  и  $c$ , но для упрощения расчетов удобно выполнять это условие.

Для практических расчетов топография должна храниться в виде дискретных значений, то есть функция двух аргументов представлена в виде двумерного массива  $y_{l,c}$ . Получение классической профилограммы  $u(x)$  вдоль любого направления  $x$  сводится фактически к двумерной интерполяции по этому массиву. Очевидно, что отдельный профиль не несет информации о всей топографии и построение топографии возможно только по достаточно большому набору таких профилей.

Вычисление любых параметров шероховатости (например, по ГОСТ 2789-73) базируется на обработке профилограмм. После получения по топографии профиля поверхности не представляет никакого труда рассчитать эти параметры. Аналогичный подход можно использовать и для получения волнистости поверхности. Параметры волнистости не стандартизованы, но обычно используют выражения, аналогичные параметрам шероховатости.

Таким образом, получение топографии поверхности дает возможность рассчитывать любые геометрические показатели обработанной поверхности – размер, отклонения формы, волнистость и шероховатость. Возможность расчета этих показателей вдоль любого направления является важным преимуществом использования топографии поверхности. Поэтому при разработке моделей операций механической обработки нужно ориентироваться на получение именно топографии поверхности детали.

Задача обеспечения заданных геометрических параметров качества обработанной поверхности значительно усложняется, если учесть, что топография (профиль) поверхности имеет стохастические характеристики. Несмотря на то, что этот факт отмечается многими авторами, степень влияния случайных факторов на топографию и параметры шероховатости практически не исследована.

Обеспечение заданного размера детали с учетом его случайного колебания достаточно хорошо описано в литературе. Аналогичный подход может быть использован и для других геометрических параметров.

Например, на рис. 1 показана кривая плотности распределения параметра шероховатости  $R_a$ . Значение  $R_{a\text{черт}}$  задано конструктором. Выполнение условия  $R_a \leq R_{a\text{черт}}$  возможно только с определенной вероятностью, определяемой площадью под кривой плотности распределения слева от значения  $R_{a\text{черт}}$ . Соответственно площадь правой части определяет вероятность брака по шероховатости.

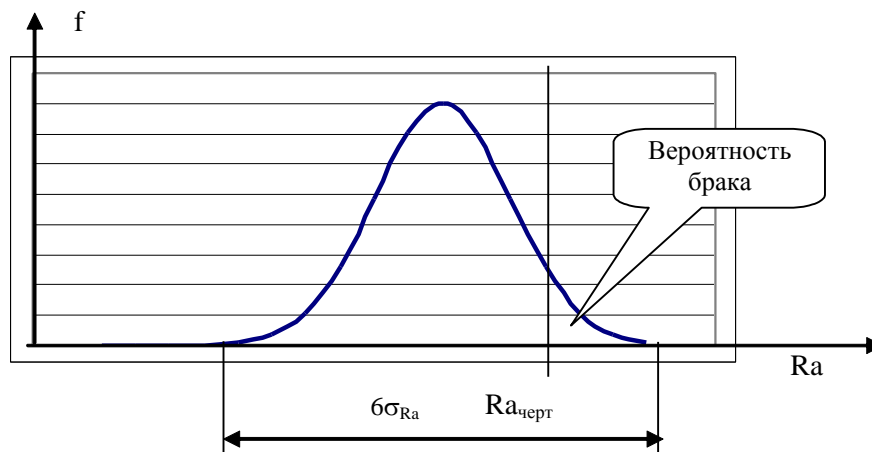


Рисунок 1 – Определение вероятности брака по шероховатости

Основные факторы, определяющие топографию поверхности детали, классифицированы А. Г. Суловым при рассмотрении ее шероховатости. В соответствии с этим топография поверхности определяется

- геометрическим копированием рабочей части инструмента в материале заготовки;
- колебательными перемещениями инструмента относительно заготовки;
- упруго-пластическими деформациями поверхностного слоя обрабатываемого материала;
- случайными вырывами обрабатываемого материала.

Эти явления сопровождаются также износом инструмента, который влияет как на его размер, так и на форму его рабочей части и динамику процесса резания (силы резания, температура и т.п.). Необходимо учитывать, что налипание материала заготовки на инструмент (наростообразование) также может изменять его геометрию и динамику резания. Кроме того, геометрия инструмента, параметры режима резания, параметры оборудования и приспособлений, физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала не являются постоянными, а содержат случайные составляющие.

В соответствии с этим в основу имитационной модели формирования топографии на операции механической обработки положен

*процесс геометрического копирования* профиля инструмента в материале изделия. С точки зрения теории множеств, процесс резания можно рассматривать как процесс многократного удаления множества точек  $M_{\Phi_{Пij}}$ , задаваемых фактическим профилем инструмента, из материала заготовки (множество  $M_i$ ). Суммарный фактический профиль инструмента может состоять из нескольких подмножеств (например, профиль режущей части шлифовального круга определяется профилями составляющих его зерен, а профиль режущей части фрезы – профилями ее зубьев). Поэтому для его описания используется объединение подмножеств. При этом в каждый момент времени  $i$  из исходного профиля (множество  $M_{i-1}$ ) вырезается пересечение этого множества с множеством фактического профиля инструмента. Этот процесс и описывает формирование нового профиля  $M_i$ :

$$M_i = M_{i-1} - \left[ \left( \bigcup_j M_{\Phi_{Пij}} \right) \cap M_{i-1} \right] \quad (1)$$

На рис. 2 приведена структура обобщенной имитационной стохастической модели формирования геометрических параметров поверхности детали. Для конкретных операций механической обработки необходимо модернизировать ее под конкретные условия резания, формируя выражение (1).

В приведенной структуре учитывается, что:

- на формирование топографии обработанной поверхности влияют параметры инструмента, оборудования, приспособления и режима резания;
- стохастические составляющие параметров этих подсистем являются аддитивными;
- параметры этих подсистем определяются также динамическими свойствами имитационной модели (обратная связь);
- топография поверхности формируется за счет геометрического копирования, воздействия колебательных, упруго-пластических деформаций и собственно случайной составляющей;
- любые геометрические параметры поверхностного слоя формируются из топографии поверхности.

Подобные модели позволяют решать достаточно широкий класс задач, связанных с проектированием операций механической обработки и в том числе поставлять данные для стохастической оптимизации подготовки поверхностей под нанесение покрытия и для размерного анализа жизненного цикла детали.

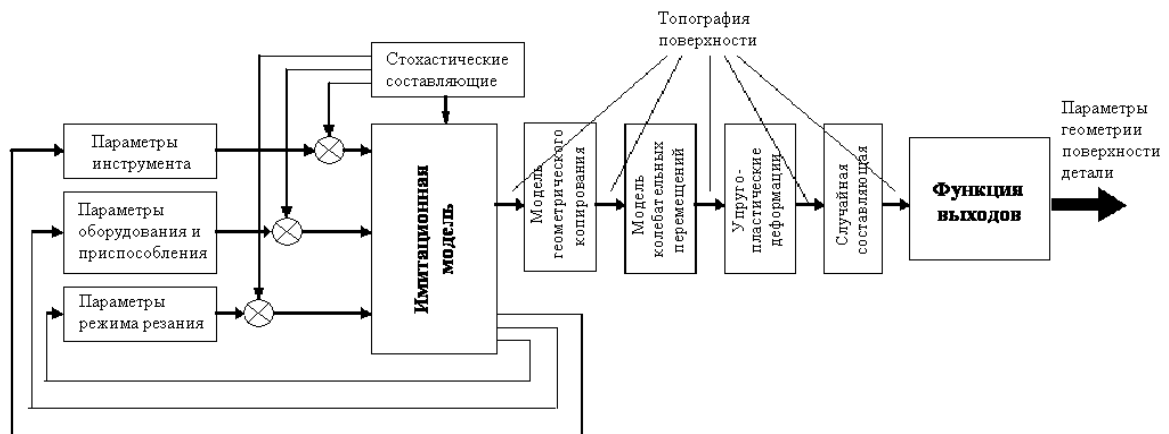


Рисунок 2 – Структура обобщенной имитационной стохастической модели операции механической обработки

Обобщенная модель применена для прогнозирования параметров шероховатости при точении, фрезеровании и абразивной обработке деталей.

На токарных операциях при геометрическом копировании параметры шероховатости определяются профилем одиночной риски. Поэтому вместо базовой длины можно использовать величину подачи  $S$ . Исходными данными является геометрия инструмента (углы в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$ , радиус при вершине резца  $r$ ) и подача  $S$ . В зависимости от значений исходных данных имеется 4 варианта профиля риски – рис. 3. Профиль риски представляется в табличном виде, по которому можно рассчитать любые параметры шероховатости.

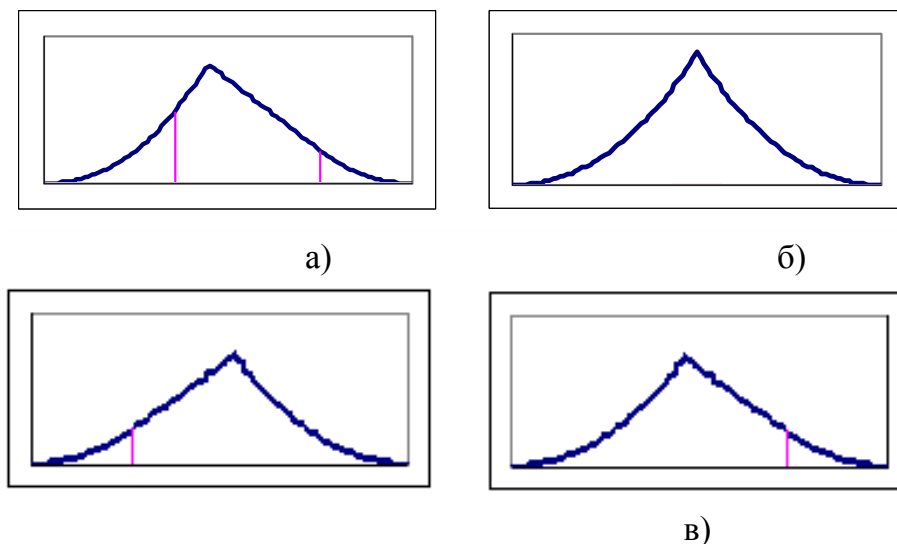


Рисунок 3 – Профиль риски: а – полный, б - в виде двух радиусных участков, в – 2 варианта неполного профиля риски.

Учет упругих и колебательных перемещений, а также многопроходности производится с использованием уравнения баланса перемещений в технологической системе:

$$t_{\phi i} = \sum_{j=1}^i t_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta r_j - \Delta_y + \Delta_{\text{вибр}} - \Delta_u \quad (2)$$

где  $t_{\phi i}$ ,  $t_i$  – фактическая и номинальная глубина резания на  $i$ -м проходе;  $\Delta r_i$  – радиальный съём металла;  $\Delta_y$  – упругие отжатия в технологической системе;  $\Delta_{\text{вибр}}$  – колебательные перемещения;  $\Delta_u$  – размерный износ инструмента.

Случайные колебания параметров геометрии инструмента ( $\phi$ ,  $\phi_1$  и  $r$ ) учитываются алгоритмом метода Монте-Карло. При этом для всех указанных параметров используется закон распределения Гаусса. Учет пластических деформаций профиля производится с использованием экспериментальных данных. Для случайной составляющей используется ее спектральное разложение в виде:

$$y_c(x) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i x + \phi_i), \quad (3)$$

где частоты  $\omega_i$  и амплитуды  $A_i$  определяются характеристиками обрабатываемого и инструментального материала, а фазы  $\phi_i$  полагаются случайными с равномерным распределением на интервале  $[0; 2\pi]$ .

Описанный алгоритм стохастического моделирования позволяет рассчитывать профиль обработанной поверхности. При этом уравнение баланса перемещений (2) и спектральное разложение (3) рассматривается в фиксированные моменты времени с шагом, равным времени оборота заготовки. Для расчета полной топографии обработанной поверхности необходимо рассматривать более мелкий шаг по времени. При описании топографии удобно использовать цилиндрическую систему координат.

Аналогичный подход использован и для исследования геометрических параметров поверхности детали и при торцевом фрезеровании с учетом особенностей кинематики и динамики обработки. Исходными данными для расчета топографии при геометрическом копировании являются диаметр фрезы, геометрические параметры ее зубьев, параметры режима резания (частота вращения, минутная подача и глубина резания), а также – угол наклона шпинделя. Учет упруго-пластических деформаций, вибраций, износа инструмента и случайной составляющей производится так же, как и при точении.

Результаты расчета выводятся в виде двумерного массива. На рис. 4 приведен пример экранной формы для вывода визуализированной информации. Кроме того, возможен расчет любых параметров шероховатости на любом участке и вдоль любого направления.

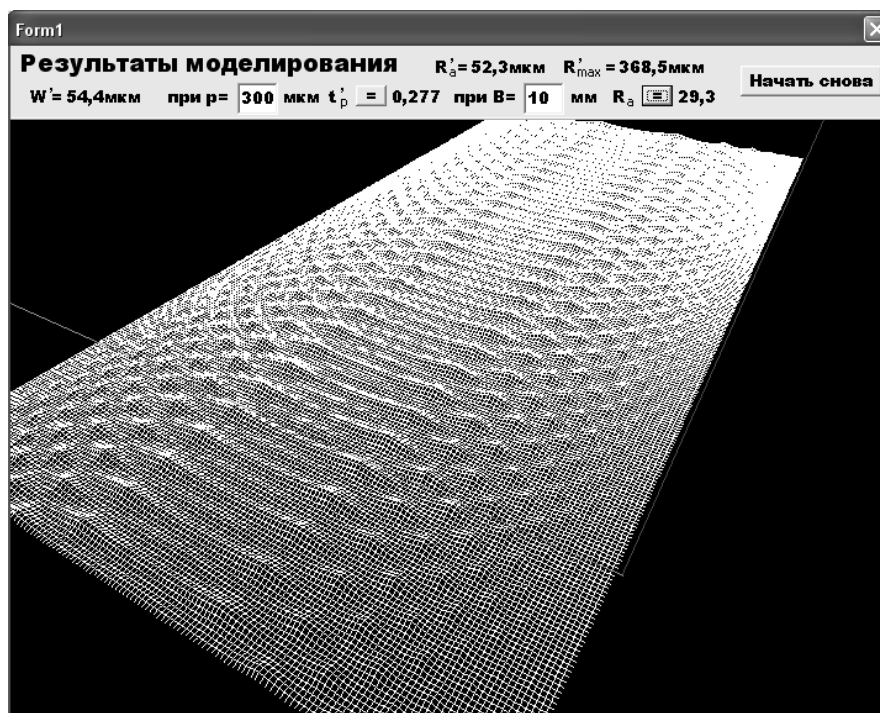


Рисунок 4 – Форма для вывода результатов моделирования при фрезеровании

Процессы абразивной обработки имеют особенности, существенно отличающие их от процессов резания лезвийным инструментом. Это беспорядочное расположение огромного количества абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, их разновысотность и неправильная геометрическая форма, наличие у них округленных вершин, обеспечивающих, как правило, отрицательные передние углы резания. Кроме того, процесс резания протекает на высоких скоростях, существенно превышающих скорости резания при лезвийной обработке.

В соответствии со структурой обобщенной математической модели формирования геометрии поверхности детали, имитационный подход при моделировании операции шлифования заключается в следующем:

- сьем металла происходит за счет взаимодействия абразивных зерен с шероховатой поверхностью заготовки;
- профиль обработанной поверхности формируется за счет наложения профилей зерна на исходный профиль поверхности заготовки с учетом упруго-пластических деформаций металла;
- координаты режущих зерен и их профиль являются случайными параметрами, которые зависят от геометрии зоны контакта, режимов резания и характеристики инструмента.

Различные методы абразивной обработки отличаются только геометрией зоны контакта шлифовального круга и заготовки. Для круглого наружного врезного шлифования она изображена на рис. 5. При этом ее угловые размеры и текущая глубина резания описываются выражениями:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{t_{\phi} R}{r(R+r)}; t = \frac{t_{\phi}}{1 - \cos \alpha} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

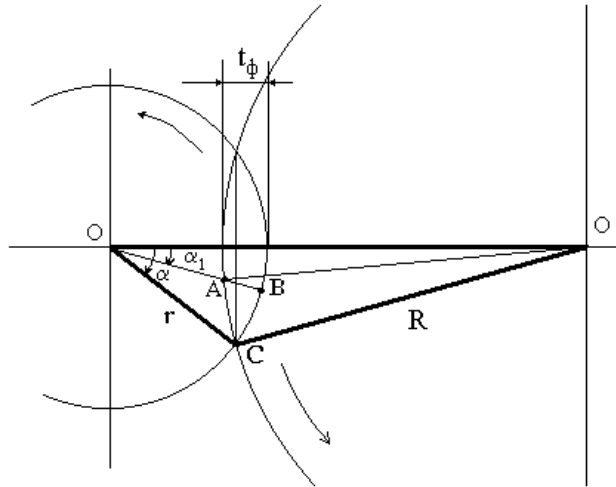


Рисунок 5 – Геометрия зоны контакта при круглом наружном шлифовании

При внутреннем шлифовании зона контакта имеет другой вид, что приводит к изменению соотношений (4). При хонинговании и суперфинишировании зона контакта имеет более простой вид прямоугольника. Для учета продольной подачи и нестационарности обработки используется уравнение баланса перемещений:

$$t_{\phi i} = t_{\phi i-1} + S_i - \Delta R_i - \Delta r_{i-1} - \Delta y_{упр} + \Delta y_{вибр}, \quad (5)$$

где  $S$  – поперечная подача на оборот детали;  $\Delta R$ ,  $\Delta r$  – износ шлифовального круга и радиальный съём металла;  $\Delta y_{упр}$   $\Delta y_{вибр}$  – упругая деформация технологической системы;  $\Delta y_{вибр}$  – вибрационная составляющая;  $i$  – номер оборота заготовки

Размерный износ инструмента учитывается уравнением баланса перемещений (5). Кроме того, он влияет на распределение геометрических размеров зерен, участвующих в резании. Упруго-пластические деформации обрабатываемого материала учитываются искажением профиля режущих зерен с учетом коэффициента стружкообразования.

Разработанные модели позволяют прогнозировать распределение параметров шероховатости при лезвийной и абразивной обработке. На рис. 6 приведен пример расчетных плотностей распределений для случайной составляющей параметра шероховатости  $R_a$ .

В расчетах использовались следующие геометрические параметры инструмента:  $\phi = 60 \dots 65^\circ$ ;  $\varepsilon = 90 \pm 1^\circ$ ;  $r = 0,2 \dots 0,25$  мм;  $V = 1,32$  м/с. Обрабатываемый материал – сталь 40.



Расчетные плотности распределения параметра шероховатости для круглого наружного шлифования приведены на рис. 7. При моделировании использованы следующие исходные данные:

Вариант 1:  $\rho = 0,02 \dots 0,03$  мм,  $N = 400 \dots 700$ .

Вариант 2:  $\rho = 0,02 \dots 0,03$  мм,  $N = 300 \dots 900$ .

Вариант 3:  $\rho = 0,01 \dots 0,1$  мм,  $N = 300 \dots 900$ .

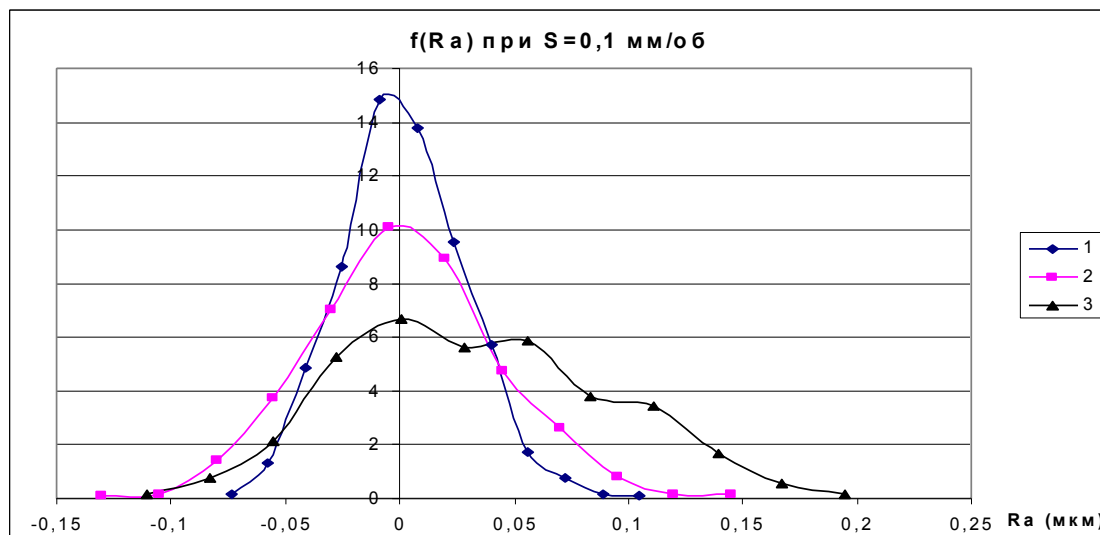


Рисунок 6 – Расчетные плотности распределения случайной составляющей параметра шероховатости Ra при точении.

1 – геометрическое копирование; 2 – копирование с учетом пластической деформации; 3 – копирование, пластическая деформация и случайная составляющая профиля

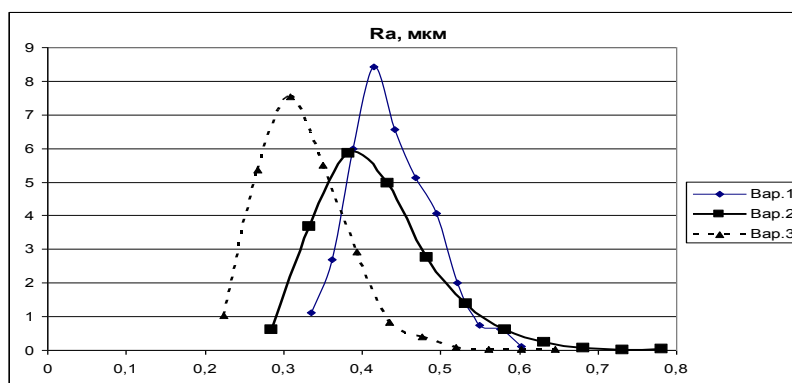


Рисунок 7 – Расчетные плотности распределения параметра шероховатости Ra при шлифовании

Экспериментальной проверкой доказана адекватности моделей реальным процессам механической обработки.

Аналогичные результаты получены и для других параметров шероховатости, как высотных, так и шаговых, а также и для относительной опорной длины профиля. На рис. 8 показаны примеры расчетных

плотностей распределения относительной опорной длины профиля при круглом наружном шлифовании. Из приведенных рисунков видно, что распределение параметров шероховатости не подчиняется нормальному закону распределения. Для его аппроксимации предложено комбинированный закон на базе бета-распределения:

$$f(tp) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^2 \alpha_i \frac{\Gamma(a_i + b_i)}{\Gamma(a_i)\Gamma(b_i)} tp^{a_i-1} (100 - tp)^{b_i-1}; \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \quad (6)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция;  $a_i, b_i$  – параметры распределения;  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты.

Для подбора весовых коэффициентов и параметров распределения использован численный алгоритм оптимизации, встроенный в надстройку "Поиск решения" табличного процессора Excel. При оптимизации использован критерий  $\chi^2$ .

Необходимость использования выражения (6) вызвана тем, что значения параметра  $tp$  должна находиться в пределах 0...100%. Это условие не обеспечивается при использовании распределения Гаусса при малых или больших значениях уровня. Бета-распределение, лежащее в основе выражения (6) гарантирует нахождение  $tp$  в диапазоне его значений.

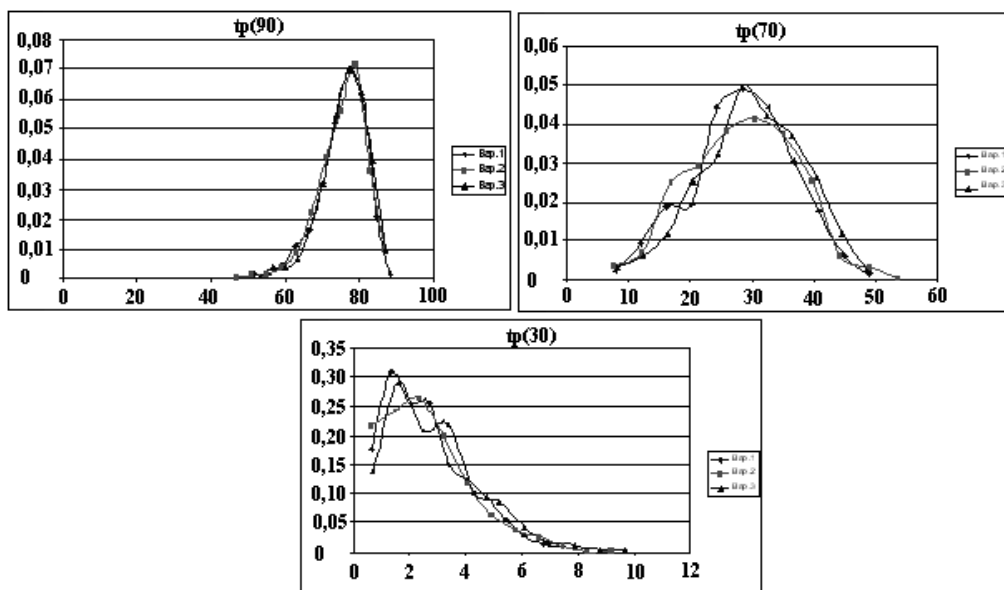


Рисунок 8 – Расчетные плотности распределения параметра шероховатости  $tp$  при шлифовании

**Список использованных источников:** 1. *Леонов С.Л., Зиновьев А.Т.* Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования. / Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. -198 с. 2. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. -684 с.