

УДК 621.923

Д.Е. Сидоров, доцент, канд. техн. наук,

С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук,

Ю.К. Новоселов, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

tm@sevntu.com.ua

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЕМА МАТЕРИАЛА НА ОПЕРАЦИЯХ ТОЧЕНИЯ, ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ШЛИФОВАНИЯ***Разработана модель съема материала на операциях точения, фрезерования и шлифования.**Ключевые слова: съем материала, точение, фрезерование, шлифование.*

Съем материала происходит в зоне контакта заготовки с инструментом, параметры которой зависят от метода обработки, кинематики процесса, параметров технологической системы, состояний рабочей поверхности инструмента и заготовки [1, 2]. Для установления общих закономерностей съема рассмотрим особенности формирования поверхностей для трех технологических операций: точения, торцевого фрезерования, шлифования (рисунок 1).

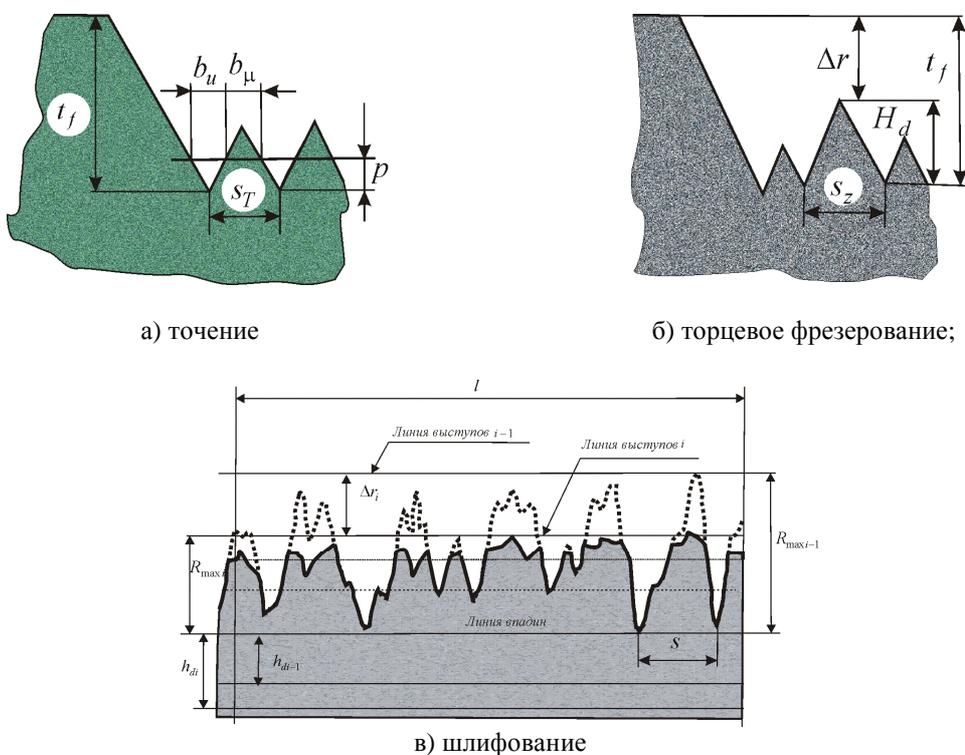


Рисунок 1 – Схемы зоны контакта

Предположим, что в заданный момент времени  $t$  все необходимые параметры зоны известны, определены характеристики совокупности поверхностей резания, описываемых режущими кромками в пространстве обрабатываемой заготовки.

Для всех трех процессов в качестве входных переменных при моделировании приняты: параметры шероховатости поверхности заготовки ( $H_3$  – толщина слоя, в котором распределена шероховатость поверхности); параметры поверхностей резания в сечении, перпендикулярном вектору скорости резания; фактическая глубина  $t_f$  (максимальное внедрение режущей части инструмента в материал заготовки); расстояние между вершинами поверхностей резания  $s$  (для токарной обработки – подача резца на оборот заготовки  $s_T$ , для фрезерования – подача на зуб фрезы  $s_z$ , для шлифования – расстояние между двумя ближайшими траекториями движения вершин зерен  $s$ ). Выходными переменными являются: радиальный съем материала  $\Delta r$ , параметры шероховатости детали.

**Целью данной статьи** является построение статистических закономерностей преобразования входных переменных в выходные.

Рассмотрим параметры, с помощью которых описывается шероховатость поверхности.

Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{\max}$ , определяемая как расстояние от максимальной вершины до впадины на базовой длине, характеризует глубину переходного слоя материал-среда и не отражает закономерностей удаления материала в зоне контакта; она не может быть принята в качестве критерия, характеризующего взаимодействие инструмента и заготовки. Аналогичное заключение можно сделать по другим высотным параметрам таким, как  $R_z$  и  $R_a$ .

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  определяет соотношение удаленной и не удаленной части материала на уровне  $p$ . Недостатком этого параметра является его связь с базовым участком профиля  $l$  и размерами выступов, оцениваемым по профилограммам обработанной поверхности. Информативность аналогичного параметра может быть существенно увеличена при переходе от экспериментальных к вероятностным характеристикам профиля. Для этого введем понятие вероятности не удаления материала на уровне  $P(\bar{M})$ , заключающейся в событии, что материал в случайно выбранной точке уровня останется не удаленным.

Вероятность не удаления материала может быть рассчитана как предел соотношения числа благоприятных событий к их общему количеству.

Вероятность не удаления материала может быть рассчитана как предел соотношения числа благоприятных событий к их общему количеству:

$$P(\bar{M}) = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum b_{mi}}{l} = \lambda M[b_m], \tag{1}$$

где  $\lambda$  – математическое ожидание числа выступов;  $M[b_i]$  – математическое ожидание ширины выступа на уровне  $p$ .

Из частотных параметров шероховатости для оценки процессов съема материала наибольший интерес представляет средний шаг неровностей по вершинам  $s$ , равный среднему шагу неровностей по впадинам.

Для расчета вероятности не удаления материала по зависимости (1) необходимо определить  $\lambda$  и  $M[b_i]$ . Математическое ожидание числа выступов (с учетом выступов с  $b_i = 0$ ) равно математическому ожиданию числа впадин и определяется кинематикой процесса. Для точения

$$\lambda = \frac{1}{s_T}. \tag{2}$$

Для фрезерования

$$\lambda = \frac{1}{s_z}. \tag{3}$$

Для шлифования  $\lambda$  соответствует среднему числу зерен, проходящих через единицу сечения.

Величину ширины единичного выступа вычисляем для частного случая, когда режущие элементы имеют одинаковую геометрию и внедряются на одинаковую глубину

$$b_m = \begin{cases} s - b_H & \text{при } s > b_H, \\ 0 & \text{при } s \leq b_H. \end{cases} \tag{4}$$

Для токарной обработки все переменные, входящие в уравнение (4), практически можно считать детерминированными величинами и поэтому в пределах слоя шероховатости поверхности

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{s_T} b_m = 1 - \frac{p}{s_T} (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1), \tag{5}$$

где  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане, соответственно.

Для процесса торцевого фрезерования  $s$  является случайной величиной в связи с наличием биения зубьев фрезы. По данным выполненных исследований расстояние от центра вращения фрезы до вершин режущих кромок распределено по нормальному закону с параметрами среднего радиуса  $r_\phi$  и  $\sigma$ .

Если случайная величина  $Y$  является функцией случайной величины  $X$ , то

$$M[Y] = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) f(x) dx, \tag{6}$$

где  $f(x)$  – плотность вероятностей распределения случайной величины  $X$ .

Для фрезерования зависимость (6) для расчета  $M[b_i]$  в (4) принимает вид

$$M[b_M] = \int_{b_H}^{\infty} (s_z - b_H) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (7)$$

где  $\bar{s}_z$  – среднее расстояние между поверхностями резания.

Для процесса шлифования расстояние между поверхностями резания, распределено по показательному закону [2]

$$f(s) = \lambda e^{-\lambda s}. \quad (8)$$

При этом зависимость (6) приобретает вид

$$M[b_M] = \int_{b_H}^{\infty} (s - b_H) \lambda e^{-\lambda s} = \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda b_H}. \quad (9)$$

Соответственно зависимости для расчета вероятности неудаления материала для процессов шлифования и фрезерования запишутся в форме:

$$P(\bar{M}) = \frac{1}{s_z \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{b_H}^{\infty} (s_z - b_H) e^{-\frac{(s_z - \bar{s}_z)^2}{2\sigma^2}} ds_z, \quad (10)$$

$$P(\bar{M}) = e^{-\lambda b_H}. \quad (11)$$

Сопоставление расчетных значений вероятности неудаления материала для трех процессов обработки приведены на рисунке 2.

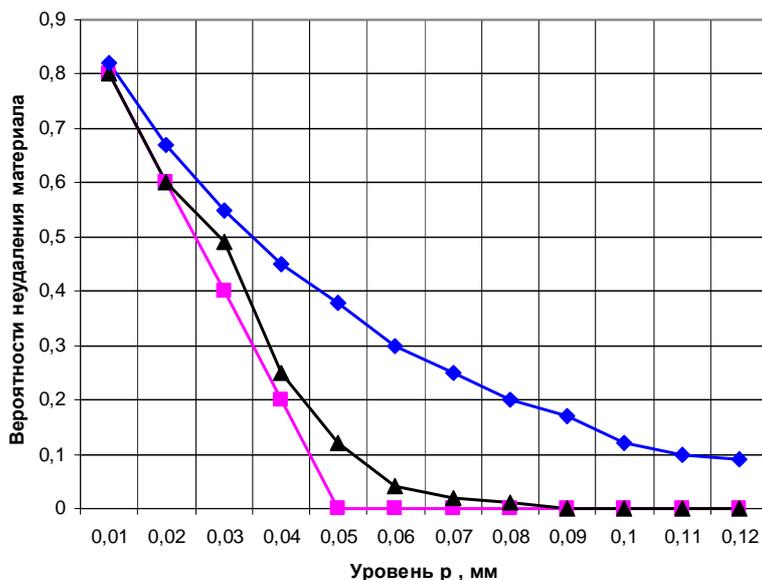


Рисунок 2 – Влияние закона распределения расстояний между поверхностями резания на вероятность неудаления материала: ■ – при точении; ◆ – при фрезеровании; ▲ – при шлифовании

При расчетах принято, что угол при вершине режущих инструментов равен 960, среднее расстояние между поверхностями резания  $\bar{s} = 0,1$  мм, число поверхностей резания на мм длины сечения  $\lambda = 10$ . Из анализа приведенных данных следует, что закон распределения между поверхностями резания существенно влияет на вероятность неудаления материала на всех уровнях.

Наибольшее значение вероятности при равных  $\lambda$  соответствуют показательному закону, наименьшее – при постоянстве расстояний  $s$ . С изменением вида закона изменяется и величина слоя шероховатости поверхности. Для токарной обработки она равна 0,05 мм ( $P(\bar{M}) = 0$ ), для фрезерования – 0,1 мм, для шлифования – 0,16 мм.

Зависимости (5), (7), (9) получены при допущении, что все вершины поверхностей резания расположены на одном уровне и имеют одинаковую геометрию.

Процесс обработки резанием сопровождается вибрациями, возникающими в технологической системе; для процесса фрезерования характерно не только осевое, но и торцевое биение зубьев фрезы; для процесса

шлифования абразивные зерна инструмента имеют различную геометрию и располагаются на различных уровнях, каждая вершина зерна имеет свою глубину резания.

С учетом расположения поверхностей резания на различных уровнях их ширина при расчете математического ожидания  $M[b_i]$  должна приниматься случайной. Уравнение для расчета  $M[b_i]$  в этом случае принимает вид

$$M[b_M] = \int_{b_H}^{\infty} \int_0^{\infty} (s - \bar{b}_H) f(s) f(b_H) db_H ds, \quad (12)$$

где  $f(b_H)$  – плотность вероятностей распределения размеров поверхностей резания на рассматриваемом уровне.

Поскольку плотности распределения  $f(s)$  и  $f(b_H)$  независимы, внутренний интеграл разбивается на разность двух интегралов, первый из которых равен  $s$ , второй – математическому ожиданию  $b_H$ .

Соотношение (12) при этом принимает вид

$$M[b_M] = \int_{b_H}^{\infty} (s - \bar{b}_H) f(s) ds. \quad (13)$$

Уравнение (13) справедливо для различных процессов формообразования. Вероятность неудаления материала на рассматриваемом уровне  $p$  зависит от математического ожидания ширины поверхностей резания, их числа, закона распределения расстояний между поверхностями резания.

Радиальный съем материала определяется по параметрам зоны контакта (см. рисунок 1).

Слой, в котором распределена шероховатость поверхности детали  $H_\delta$ , рассчитывается из уравнений (10), (11). Для этого достаточно установить связь размеров поверхностей резания  $b_H$  с уровнем  $p = H_\delta$ , соответствующим верхней границе слоя шероховатости.

Параметры шероховатости  $t_p$  и  $R_a$  могут быть рассчитаны по вероятности неудаления материала  $P(\bar{M})$  по зависимостям приведенным в [2,3].

Таким образом, закономерности для расчета вероятности неудаления материала, и построенные на их основе зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности являются общими для процессов формообразования при обработке заготовок точением, фрезерованием и шлифованием и могут служить основой построения статистических моделей технологических операций.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. — 232 с.
3. Братан С.М. Идентификация параметров съема при комбинированном шлифовании токопроводных керамических материалов / С.М. Братан // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. науч. тр. — Донецк, 2000. — Вып. 9. — С. 24–32.

*Поступила в редакцию 22.03.2013 г.*

#### **Сидоров Д.Є., Братан С.М., Новосолов Ю.К. Моделювання зйому матеріалу на операціях точіння, фрезерування та шліфування**

Розроблено методику зйому матеріалу на операціях точіння, фрезерування та шліфування.

**Ключові слова:** зйом матеріалу, точіння, фрезерування, шліфування.

#### **Sidorov D.E., Bratan S.M., Novosolov J.K. Modeling of material removal's operations turning, milling and grinding**

A method of material removal while turning, milling and grinding is developed.

**Keywords:** removal of material, turning, milling, grinding.