

УДК 621.923

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

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь

Sidorov-sntu@yandex.ru

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АБРАЗИВНО-АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИТЕЗА САУ ТП ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

Выполнен анализ математических моделей абразивно-алмазной обработки материалов для ситеза САУ ТП чистового шлифования, который показал, что для обеспечения качества и эффективности операций чистового шлифования возможно только на основе комплексных динамических моделей, учитывающих стохастический характер протекающих процессов.

Ключевые слова: *чистовое шлифование, математическая модель, абразивно-алмазная обработка.*

Введение. Высокий уровень требований к современным машинам и приборам обусловил ряд проблем, связанных с созданием высокопроизводительных технологических процессов, обеспечивающих изготовление деталей с заданными параметрами качества. Параметры качества определяют функциональную пригодность деталей (возможность собираемости в сборочные единицы, узлы и агрегаты, обеспечение герметичности стыков и др.), их эксплуатационные характеристики (усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, контактную жесткость и др.) [1].

Окончательно такие параметры формируются на финишных операциях, в числе которых особое место по применимости принадлежит чистовому шлифованию. В современных условиях при работе на форсированных технологических режимах в силу возрастания чувствительности процессов к возмущающим факторам наблюдается потеря стабильности технологической системы (ТС) и технологического процесса (ТП) [2], параметры технологической системы могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов. важным показателем качества технологических систем обработки деталей и особенно тс финишных операций является их стабильность, отсутствие стабильности при традиционных технологиях неизбежно приводит к разбросу показателей качества выпускаемой продукции. Процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, при резании изменяются не только параметры объекта, но и самой ТС. Это приводит к нестабильности качества изделий и не позволяет в полной мере использовать значительные технологические возможности чистового шлифования как финишной операции.

Для компенсации воздействия возмущений обычно пытаются использовать замкнутые системы с приборами активного контроля. Однако, вследствие отсутствия адекватных моделей протекающих процессов, возмущений ТС, комплекса средств диагностики, недоступности ряда параметров непосредственному измерению и контролю, они не получили широкого распространения.

Обеспечение качества и эффективности операций чистового шлифования возможно только на основе комплексных динамических моделей, учитывающих стохастический характер протекающих процессов.

Целью данной статьи является анализ математических моделей абразивно-алмазной обработки материалов для ситеза САУ ТП чистового шлифования.

Основное содержание работы. Начиная с первых работ по теории шлифования, появившихся в конце 30-х годов, до середины 70-х годов развитие теории шлифования шло преимущественно по пути установления и научного обобщения экспериментальных данных, полученных с использованием методов математической статистики. К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальной информации, касающейся работоспособности шлифовальных кругов при обработке различных по физико-механическим и химическим свойствам обрабатываемых материалов в широком диапазоне изменения условий шлифования. Увязаны основные технологические параметры шлифования с режимами резания, характеристиками кругов и обрабатываемых материалов, которые положены в основу существующей нормативно-справочной документации по шлифовальным работам [1].

Применение аналитических методов расчета параметров шлифования в эти годы ограничилось в основном качественным анализом процесса и его технологических возможностей, за исключением отдельных решений по теплофизике шлифования и напряженно деформированному состоянию в зоне резания при микрорезании единичным зерном.

В начале 60-х годов проф. Редько С.Г. [1] показал что, не все зерна участвуют в резании. «Часть зерен проходит “след в след”, вторая часть – лишь упруго и пластически деформирует материал без образования стружки, третья часть – из-за недостаточного выступа над уровнем связки вообще не контактирует с обрабатываемым материалом. Производит сьем материала всего 5...12% зерен, видимых на рабочей поверхности круга...».

Благодаря теоретическим работам отечественных ученых в 70-е годы появились математические модели, более адекватно отражающие процесс шлифования [4, 5]. Появлению этих работ способствовали глубокие экспериментальные исследования параметров рабочего слоя круга по распределению в нем зерен и закономерностей их участия в процессе резания. Многочисленными исследованиями установлено, «...что, несмотря на случайное расположение зерен в связке, их разнообразную геометрическую форму и разброс размеров, рабочая поверхность круга достаточно полно может быть описана рядом вероятностных законов распределения (высот вершин зерен над уровнем связки, расстояний между отдельными зернами, радиусов округления их вершин), числом зерен на единице площади круга и коэффициентом длины контактной линии профиля, изменяющейся по высоте рабочего слоя круга. Применение других статистико-вероятностных характеристик не вносит принципиальных изменений в описание рабочей поверхности круга...» [4]. В отечественной и зарубежной литературе существуют различные мнения относительно основного закона распределения разновысотного расположения вершин зерен над связкой. Так, по данным одних работ, закон распределения является равномерным, по данным других – нормальным, по данным третьих – треугольным и т.д. [2].

Такое многообразие вероятностных результатов описания распределения зерен в объеме рабочего слоя обусловлено в основном разнообразием уравнений, аппроксимирующих с достаточной для практики точностью распределение вершин зерен в данном шлифовальном круге для частных условий эксперимента [4].

С учетом трансформации исходного закона разновысотности зерен Аврутиным Ю.Д и Евсеевым Д.Г., выполнен расчет средней высоты микронеровностей в поперечном сечении заготовки. Авторам удалось математически установить влияние различных факторов на основные показатели процесса через изменение относительной опорной длины микро профиля круга [4].

При построении расчетной методики использовался метод профилографирования рельефа круга, что позволяет достаточно точно выявить связь между параметрами рельефа круга, кинематикой шлифования и шероховатостью обработанной поверхности на начальном этапе шлифования до момента времени, пока износом круга можно пренебречь, с другой стороны, если состояние круга изменяется за период его стойкости, то использование первоначально полученных данных приводит к существенным разбросам показателей качества, и требует коррекции путем многократно профилографирования круга за период его стойкости.

В данных работах нет четкого аналитического решения, позволяющего применять результаты исследований для различных способов и схем шлифования.

Достаточно широкое развитие теоретико-вероятностный подход получил в работах проф. Резникова А.Н. и Федосеева О.Б. [1], в которых рассматриваются вопросы аналитического расчета параметров шероховатости поверхности при обработке деталей алмазными инструментами. Авторами работ показано, что «...вследствие взаимного движения круга и заготовки, исходный закон разновысотного распределения вершин зерен над связкой круга трансформируется в новый кинематический закон.

Новым кинематическим законом, является множитель $\int_{y_0}^{y_i} f(y') \cdot dy'$, представляющий собой определенный интеграл от старого закона $f(y')$ с измененными пределами интегрирования».

Далее используя теорему умножения независимых случайных величин, авторами получены соотношения для определения вероятности того, что выбранная точка в сечении заготовки с координатой y не будет срезана зернами m_i :

$$P_i = \exp \left[- \frac{2tg\gamma \cdot V \cdot n}{W} \cdot \int_{y_0}^{y_i} f(y') \cdot (y - y_i) \cdot \Delta y_i \cdot dy' \right].$$

Вследствие того, что авторам не удалось раскрыть сложную закономерность съема металла и, соответственно, образования шлифованной поверхности по всей длине дуги контакта круга с заготовкой при круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании, то приведенная зависимость применима лишь к врезному шлифованию прямолинейного образца.

Значительное внимание исследованию процессов шлифования уделено в работах Грабченко А.И., Узуняна М.Д., Беззубенко Н.К., Доброскока В.Л., Федоровича В.А. [5,7] и других авторов, которые, используя различные статистико-вероятностные методы, получили расчетные зависимости параметров шероховатости обрабатываемой поверхности применительно к конкретным схемам и условиям шлифования.

Авторами показано, что любые выводы о количестве рабочих зерен, о процентном соотношении их с зернами на поверхности круга могут иметь реальный смысл лишь применительно к конкретным, присущим данному процессу условиям, что связано с нестационарностью процессов шлифования.

Это нужно учитывать при моделировании процессов. При чистовом шлифовании движение абразивных зерен при их внедрении в тело заготовки происходит в слое шероховатости, что требует учета особенностей стружкообразования при моделировании электроэрозионных процессов в зоне контакта круга и заготовки. Для решения такой задачи необходимо уточнение модели взаимодействия абразивных зерен с поверхностным слоем заготовки.

В работе Яна Бурека [6] на основе приведенных рассуждений автором предложена расчетная динамическая модель процесса врезного шлифования по нормальной динамической силе F_{cn} , действующей на обрабатываемую деталь:

$$G_F(S) = \frac{F_{cn}(S)}{x_{sm}(S) - x_c(S)},$$

где G_F – передаточная функция нормальной силы.

Эта динамическая система осуществляет стабилизацию упругой деформации x_c , «...которая имеет влияние на характеристики динамического контура шлифования...».

Упрощенная модель, заложенная в основу разработанной САУ, приводит к нестабильности выходных параметров качества.

В Харьковском национальном политехническом университете разработана модель для системы адаптивного управления процессом врезного шлифования [10], в основе которой лежит система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (h_1 + h_2) \dot{x}_1 + (c_1 + c_2) x_1 - c_2 x_2 - h_2 \dot{x}_2 &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + (h_2 + h_3) \dot{x}_2 + (c_2 + c_3) x_2 - c_3 x_3 - c_2 x_1 - h_2 \dot{x}_1 - h_3 \dot{x}_3 &= P_0 \sin \omega \cdot t, \\ m_3 \ddot{x}_3 + (h_3 + h_4) \dot{x}_3 + (c_3 + c_4) x_3 - c_3 x_2 - h_3 \dot{x}_2 &= 0 \end{aligned}$$

где $P_0 \sin \omega \cdot t$ – внешняя возмущающая сила, c_1, h_1, m_1 – приведенная жесткость, демпфирование и масса детали, c_2, h_2, m_2 – приведенная жесткость, демпфирование и масса круга, c_3, h_3, m_3 – приведенная жесткость, демпфирование и масса шлифовальной бабки.

Рассмотренная модель не учитывает отклонения формы детали и круга от номинальной и производные указанных параметров. В модель искусственно введена внешняя возмущающая сила, параметры которой должны выбираться экспериментально, и не могут быть заданы для широкого диапазона внешних возмущений.

Первая общая вероятностная модель шлифования, лишенная многих недостатков математических моделей других исследователей разработана проф. Королевым А.В. [8]. В его работах дано описание профиля единичных зерен, законов их распределения по поверхности, исследовано влияние правки на число и распределение зерен, предложены зависимости прогнозирования параметров шероховатости по фактической глубине резания. При построении математической модели автор различает «...два качественно отличных процесса образования шлифовальной поверхности:

1. Микронеровности поверхности содержат следы от зерен, оставленных ими только на последнем проходе.
2. Микронеровности содержат следы от зерен, оставленных ими не только на последнем, но и на предыдущих проходах.

Критерием для определения перехода процесса шлифования от одного из этих видов к другому принята условная высота неровностей шлифуемой поверхности H_{yc} , равная расстоянию средней линии АМ между вершинами неровностей в данном поперечном сечении обрабатываемой заготовки до уровня самых глубоких впадин, имеющих на этой поверхности. Расчет средней высоты микронеровностей получаемой поверхности производится из условия, что ширина всех зерен, прошедших через данное поперечное сечение на уровне линии АМ, равна ширине шлифования l_δ :

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = l_\delta,$$

где $z_{сеч}$ – число зерен, оставивших свой след в данном поперечном сечении заготовки; b_i – текущая ширина зерна на уровне линии АМ...»

Учитывая, что «...средняя высота микронеровностей H_{cp} определяется средней арифметической высотой микронеровностей от гребня до впадины на участке шлифования, получена зависимость:

$$H_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i}{z_{сеч}},$$

где a_i – глубина вдавливания зерна в данном поперечном сечении заготовки...»

Случайную величину a_i предлагается определять из выражения:

$$a_i = (H_{\max} - h_i) \cdot P_{\text{вн}},$$

где $(H_{\max} - h_i)$ – максимально возможная глубина вдавливания рассматриваемого зерна в поперечном сечении заготовки; $P_{\text{вн}}$ – вероятность внедрения зерна

$$P_{\text{вн}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(H_{\text{yc}} - h_i)^{0.5}}{H_{\text{yc}}^{0.5}}.$$

Согласно приведенной зависимости, величина $P_{\text{вн}}$ для зерна с координатой $h_i = 0$, т.е. в этом случае зерно не оставит свой след в поперечном сечении заготовки.

Для определения опорной длины шлифованной поверхности и других параметров шероховатости автор вводит понятие вероятности перекрытия канавок от зерен по ширине:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \lambda_i = l_{\text{д}} - P_{\text{пер}} \cdot \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i,$$

где $\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i$ – сумма ширины поцарапанных абразивными зернами канавок на уровне λ_i , мм.

Для расчета параметров процесса, автором предложена следующая методика.

«Произвольное абразивное зерно оставляет в поперечном сечении заготовки канавку, ширина которой на уровне λ_i равна b_i . Тогда ширина канавки $b_{\kappa 2}$, поцарапанная следующим абразивным зерном, будет равна ширине зерна на данном уровне b_2 , с учетом вероятности внедрения этого зерна в металл, оставшийся в расчетном сечении на уровне λ_i , после царапания предыдущим абразивным зерном:

$$b_{\kappa 2} = b_2 \cdot \frac{l - b_1}{l} = b_2 \cdot \left(1 - \frac{b_1}{l}\right),$$

Следующее абразивное зерно поцарапает канавку, ширина которой на уровне λ_i , будет:

$$b_{\kappa 3} = b_3 \cdot \frac{l - b_{\kappa 1} - b_{\kappa 2}}{l} = b_3 \cdot \left[1 - \frac{b_1}{l} - \frac{b_2}{l} \cdot \left(1 - \frac{b_1}{l}\right)\right] \text{ и т.д.}$$

Тогда ширина итоговой канавки на уровне λ_i в данном поперечном сечении заготовки металлом после выхода этого сечения из зоны контакта с кругом будет равна:

$$\begin{aligned} \frac{\sum l_i}{l_i} &= 1 - \frac{1}{l}(b_1 + b_2 + b_3 + \dots) + \frac{1}{l^2}(b_1 \cdot b_2 + b_1 \cdot b_3 + b_2 \cdot b_3 + \dots) - \\ &- \frac{1}{l^3}(b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 + b_1 \cdot b_2 \cdot b_4 + \dots) = 1 - \left(\frac{\sum b_i}{\lambda_i}\right)^{z \cdot \lambda_i}. \end{aligned}$$

Рассмотренные зависимости позволили значительно приблизить расчетную схему шлифования к реальной и получить аналитические результаты, по сходимости близкие к экспериментальным.

Работы А.В. Королева, О.Б.Федосеева, А.Н. Резникова внесли существенный вклад в развитие теории формообразования, но полностью не решили проблемы. В них не рассматриваются изменения, возникающие в технологической системе за период обработки одной детали и стойкости инструмента, учитывается только одна из сторон процесса – его стохастическая природа. Все расчеты выполнены для неизменных, установившихся условий шлифования (постоянство режимов резания, геометрии режущих кромок, числа зерен и т.д.). В силу вышеизложенного рассмотренные модели не позволяют прогнозировать изменение параметров качества за цикл обработки детали, оценивать съем металла, износ круга, точность обработки и ряд других параметров. Чтобы решить эти вопросы, нужен новый подход, учитывающий не только стохастическую природу, но и динамическую сущность процесса.

Такой подход для формализации процессов шлифования предложен проф. Новосёловым Ю.К. [2]. Используя элементы теории массового обслуживания, автор доказал, что участие зерен в резании соответствует простейшим потокам. В частности, в рассматриваемом случае, расстояние между двумя соседними траекториями движения вершин абразивных зерен $l_{\text{тр}}$ в поперечном сечении заготовки распределено по показательному закону:

$$f(l_{\text{тр}}) = \lambda \cdot e^{-\lambda l_{\text{тр}}},$$

где $f(l_{\text{тр}})$ – плотность распределения случайной величины $l_{\text{тр}}$; λ – математическое ожидание числа вершин зерен, проходящих через единицу длины сечения.

Рассматривая положение единичных рисков в поперечном сечении, автор показал, что на участке сечения, на уровне y от максимальной вершины профиля исходной поверхности, металл в промежутке между соседними рисками остается не удаленным, если расстояние между ними будет больше суммы половины размеров профиля абразивного зерна, прошедшего справа и слева от выступа шероховатости. Если металл между рисками полностью не удален, то длина сечения i -го выступа шероховатости определится как разность расстояний между рисками и шириной абразивного зерна $b_{Mi} = (l_{\text{тр}} - b_3)$, а математическое ожидание выступа и вероятность удаления материала вычисляются:

$$M[b] = \int_{l_3}^{\infty} (l_{\text{тр}} - b_3) \cdot f(l_{\text{тр}}) \cdot dl_{\text{тр}} = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda b_3};$$

$$P(M) = 1 - e^{-\lambda \cdot b_3} = 1 - e^{-a}.$$

Для определения вероятности удаления материала в случае, если вершины зерен внедряются на различную глубину, автор допускает, что через сечение проходит две группы абразивных зерен. Одна группа – с математическим ожиданием λ_1 внедряется на глубины t_1 , вторая группа – с математическим ожиданием λ_2 внедряется на глубину t_2 . Предполагается, что прохождение первой и второй групп зерен по одному и тому же участку сечения является независимыми, вероятность удаления металла описывается зависимостью:

$$P(\bar{M}_1 \bar{M}_2) = P(M_1) \cdot P(M_2) = e^{-\lambda_1 b_{31} - \lambda_2 b_{32}}.$$

Аналогично представлены зависимости, как для нескольких групп зерен, так и для всей их совокупности, отличающихся глубиной микрорезания:

$$P(M) = \lim_{l \rightarrow \infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b_{3i}}{l}\right) \right] = 1 - e^{-\lambda \bar{b}_3},$$

где b_{31} и b_{32} – ширина профилей абразивных зерен, проходящих через сечение.

При таком подходе основная задача определения $P(M)$ состоит в суммировании величин b_{3i} . Для этого зависимость для расчета $P(M)$ запишется:

$$P(M) = 1 - e^{-a(y) - a(y, \tau)},$$

где $a(y)$ – показатель, определяющий вероятность удаления материала на уровне y до входа сечения в зону контакта заготовки с кругом; $a(y, \tau)$ – показатель, определяющий изменение вероятности удаления материала в зоне контакта заготовки с кругом.

В [2] рассматривается изменение вероятности удаления материала на фиксированном уровне y при одном контакте сечения заготовки с кругом. Принимается, что за время Δt сечение поворачивается на угол ϕ и через него проходит участок круга с длиной дуги $(V_{\text{кр}} \pm V_{\text{заг}}) \cdot \Delta t$. Тогда из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля b_{3y} будут иметь абразивные зерна, вершины которых расположены в слое круга $\Delta U \cdot (V_{\text{кр}} \pm V_{\text{заг}}) \cdot \Delta t$. Число таких вершин с учетом плотности распределения $f(U)$ выразится:

$$\Delta \lambda = n_3 \cdot f(U) \cdot \Delta U \cdot (V_{\text{кр}} \pm V_{\text{заг}}) \cdot \Delta t,$$

Изменение параметра $\Delta a(y, \tau)$ характеризуется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен проходящих через сечение и равно $\Delta a(y, \tau) = b_3(y) \cdot \Delta \lambda$. Интегрированием $\Delta a(y, \tau)$ определяется $a(y, \tau)$ и, следовательно, функция $P(M)$.

Анализируя математическую модель шлифования, предложенную Новосёловым Ю.К., можно отметить, что она, показывая адекватную картину при описании процессов абразивной обработки, но требует дальнейшей доработки для процессов комбинированного шлифования и только в этом случае может быть использована при расчете циклов программного управления комбинированными операциями чистового шлифования.

Вследствие случайного рельефа такой поверхности, отрывы основания стружки от поверхности тела заготовки могут происходить еще до окончания выхода рабочего зерна из зоны контакта

шлифовальный круг-заготовка не вызывая при этом электроэрозионных разрядов. По-видимому, этим эффектом объясняется тот факт, что число разрядов в зоне контакта при комбинированном шлифовании существенно меньше числа режущих зерен [3].

В работе [3] получены функции $a(\phi_i, R_i)$ и $b(\phi_j, R_j)$, которые характеризуют изменчивость математического ожидания и дисперсии радиуса, соответственно.

Для случая одномерного нормального марковского процесса при начальном условии $r(0) = r_0$ получено решение:

$$w(R, \phi | R_0, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2[1 - \exp(-2\alpha\phi)]}} \exp\left\{-\frac{[R - R_0 \exp(-\alpha\phi)]^2}{2\sigma^2[1 - \exp(-2\alpha\phi)]}\right\}, \quad (1)$$

которое представляет собой нестационарную условную плотность вероятности. Из (1) непосредственно определяются нестационарное математическое ожидание и нестационарная дисперсия процесса:

$$\begin{aligned} M(\phi) &= R_0 \exp(-\alpha\phi); \\ D(\phi) &= \sigma^2[1 - \exp(-2\alpha\phi)]. \end{aligned} \quad (2)$$

В предположении больших величин $\phi \gg \frac{1}{\alpha}$, что справедливо, например, для случая торцевого шлифования, может быть получена и непосредственно использована установившаяся плотность условной вероятности, а ее параметры могут быть непосредственно оценены по соотношениям (1), (2), т.е.

$$w_{st}(R) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma^2 = \frac{\beta^2}{4\alpha} \Xi_0.$$

Полученная стационарная часть решения (2) является ядром функционалов, рассматриваемых в [2] для оценок среднего числа стружек, образуемых режущей кромкой зерна, и их средней длины и др.

Вид полученных соотношений непосредственно показывает, что существенная часть стружек, образованных режущими кромками, контактирующими с шероховатой поверхностью заготовки, образуют короткие стружки, не соприкасающиеся со связкой до отрыва от тела заготовки даже без учета их усадки.

Полученные соотношения могут быть использованы при определении количества стружек вызывающих эрозионный разряд при решении задач шлифования.

Анализ рассмотренных работ позволяет четко выделить два подхода, связывающие процесс микрорезания со съемом припуска. К первому – относятся подходы, основанные на принципе копирования поверхности шлифовального круга в материале заготовки. При этом на поверхности инструмента выделяются режущие профили без выделения отдельных зерен. По набору этих профилей, с учетом кинематики шлифования строится режущий профиль, который копируется на заготовке.

Недостатком этого подхода является отсутствие учета упруго-пластических деформаций металла, разделение профиля на режущие, скользящие, давящие и не режущие зерна. К другому – подходы, основанные на принципе моделирования поверхности инструмента как совокупности случайно расположенных зерен определенной геометрии. Этот подход использован в работах Королева А.В., Новоселова Ю.К., и других. Модели, основанные на этом подходе, более точны, но разработаны только для ограниченных областей применения и требуют дальнейшей доработки для моделирования всего многообразия процессов протекающих при различных видах шлифования.

Выводы. Вследствие отсутствия комплексных адекватных моделей протекающих процессов, возмущений ТС, замкнутые системы с приборами активного контроля не обеспечивают требуемой стабильности параметров качества выпускаемой продукции. Обеспечение качества и эффективности операций чистового шлифования возможно только на основе комплексных динамических моделей, учитывающих стохастический характер протекающих процессов.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. При стабилизации качества изделий при чистовом шлифовании необходимо комплексное решение всех вышеуказанных задач, которые представляют собой нерешенную до настоящего времени проблему и представляют собой перспективы дальнейших исследований в данной области.

Библиографический список использованной литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 390 с.

2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — 304 с.
3. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006 : утв. 01.07. 2006 / Братан Сергей Михайлович. — Одесса, 2006. — 321 с.
4. Аврутин Ю.Д. Формирование шероховатости поверхности деталей при шлифовании периферией / Ю.Д. Аврутин // Станки и инструмент. — 1979. — № 1. — С. 24–27.
5. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Н.К. Беззубенко /ХГПУ. — Харьков, 1995. — 46 с.
5. Богомолов Н.И. О сущности процесса абразивной доводки / Н.И. Богомолов // Передовая технология и автоматизация управления процессами обработки деталей машин. — Л.: Машиностроение, 1970. — С. 98–105.
6. Бурек Я.Н. Адаптивное регулирование процессом врезного шлифования валов: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Я.Н. Бурек / КПИ. — К., 1997. — 32 с.
7. Грабченко А.И. Схемы непрерывного управления рельефом кругов в процессе алмазного шлифования / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Л. Доброскок // Резание и инструмент. — 1986. — Вып. 35. — С. 57–63.
8. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. — Саратов, 1975. — 189 с.
9. Узунян М.Д. Теоретический анализ и расчет количества зерен на рабочей поверхности алмазного круга / М.Д. Узунян // Резание и инструмент в технологических системах. — 1978. — Вып. 19. — С. 75–82.
10. Ушаков А.И. Математическое моделирование формирования погрешности формы детали в автоматическом цикле шлифования / А.И. Ушаков, О.И. Серховец, А.В. Фесенко // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. — Харків: ХДТУСГ, 2002. — Вип. 10. — С. 174–179.

Поступила в редакцию 05.01.2014г.

Сидоров Д.С. Аналіз математичних моделей абразивно-алмазного обробки матеріалів для синтезу САУ ТП чистового шліфування

Виконано аналіз математичних моделей абразивно-алмазного обробки матеріалів для синтезу САУ ТП чистового шліфування, який показав, що для забезпечення якості та ефективності операцій чистового шліфування можливе лише на основі комплексних динамічних моделей, що враховують стохастичний характер процесів, що протікають.

Ключові слова: чистове шліфування, математична модель, абразивно-алмазна обробка.

Sidorov D.E. Analysis of mathematical models of abrasive diamond processing materials for synthesis of automatic control system of technological process finish grinding

The analysis of mathematical models of abrasive diamond processing materials for the synthesis of automatic control system of technological process finish grinding, which showed that to ensure the quality and effectiveness of operations finishing grinding is possible only on the basis of complex dynamic models that take into account the stochastic nature of the processes.

Keywords: finish grinding, mathematical model, abrasive diamond processing.