

УДК 921.623

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПЫТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**Валерий Васильевич Полтавец¹**, д-р техн. наук**Наталья Владимировна Водолазская²**, канд. техн. наук¹ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, Россия²ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», Москва, РоссияТел.: +7(949) 3349248; E-mail: poltavetsvv@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены используемые для оптимизации структуры, схем и режимных параметров процесса шлифования труднообрабатываемых инструментальных материалов опытно-статистические и аналитические модели. Отмечено, что формообразование рабочей поверхности инструмента из сверхтвердых материалов на металлической связке происходит под влиянием взаимосвязанных процессов автогенерации макрогеометрии инструмента при обработке и воздействия дополнительной электрической энергии на связку. Имитационные модели обработки должны учитывать вероятностный подход к процессу удаления обрабатываемого материала и связки в результате совместных механических и эрозионных воздействий. Выделены отличительные особенности и ограничения областей применения рассмотренных моделей. Установлено, что при оптимизации процесса шлифования на основе использования имитационных моделей обработки, всякая модель обязательно включает в себя составляющие, которые определяются опытно-экспериментальным методом.

Ключевые слова: шлифование, алмазно-абразивный инструмент, оптимизация, схема обработки, режимные параметры резания, припуск, вероятность, зерно.

**ALGORITHMIC SUPPORT FOR PROCESS OPTIMIZATION
OF GRINDING OF TOOL MATERIALS BASED ON
EXPERIMENTAL-STATISTICAL AND ANALYTICAL MODELS****Valeriy V. Poltavets**, D. Eng.**Nataliia V. Vodolazskaya**, Ph. D.

Abstract. The paper discusses experimental-statistical and analytical models used to optimize the structure, schemes and conditions of the grinding process of hard-to-cut tool materials. It is noted that the formation of the working surface of the tool from superhard materials on a metal binder occurs under the influence of interconnected processes of auto-generation of tool macrogeometry during machining and the effect of additional electrical energy on the binder. Simulation models of machining should take into account the probabilistic approach to the process of removing the material being machined and binder as a result of joint mechanical and erosion effects. Distinctive features and limitations of the areas of application of the considered models are highlighted. It has been established that when optimizing the grinding process based on the use of simulation machining models, any model necessarily includes components that are determined by an experimental method.

Keywords: grinding, diamond abrasive tool, optimization, machining scheme, cutting parameters, allowance, probability, grain.

Введение

На протяжении достаточно длительного времени для поиска оптимальных условий шлифования кругами из сверхтвердых материалов (СТМ) используют опытно-статистические модели, основанные на кибернетическом подходе [1, 2]. Эти модели отличаются способом определения направления движения в факторном пространстве для достижения оптимума функции отклика и организацией самого движения.

Оптимизация процесса шлифования с помощью опытно-статистических моделей достаточно трудоёмка и в ряде случаев не позволяет раскрыть физическую природу влияния факторов на целевую функцию, что усложняет управление процессом.

Кроме того, предложены математические модели процесса алмазно-абразивной обработки на основе полученных аналитических зависимостей между режимами шлифования и эксплуатационными свойствами деталей машин и инструментов: составом поверхностного слоя детали, его фазовым состоянием, микроструктурой и др. [3-5].

Методики, основанные на использовании описанных моделей, позволяют осуществить многокритериальную оптимизацию режимов абразивной обработки, однако они неприменимы или ограниченно применимы для определения режимов отдельных видов шлифования, например, обработки с управлением параметрами рабочей поверхности круга (РПК) в реальном времени по следующим причинам:

- большинство методик не учитывает изменения глубины шлифования во времени при обработке с фиксированной силой поджима шлифовального круга к заготовке, вследствие чего, в частности, изменится производительность обработки;
- при минимизации затрат энергии на обработку при шлифовании кругами из СТМ с фиксированной силой поджима шлифовального круга к заготовке методики не учитывают или не полностью учитывают непроизводительный расход инструмента в результате управляющих воздействий на РПК.

Целью исследования является определение возможностей и направлений совершенствования алгоритмического обеспечения оптимизации процесса шлифования заготовок из труднообрабатываемых инструментальных материалов (сверхтвердых поликристаллических материалов (СТПМ), твердых сплавов, новых инструментальных сталей).

1. Оптимизация структуры и режимных параметров процесса шлифования

При создании гибких производственных модулей (ГПМ) абразивной обработки для инструментальных гибких автоматизированных производств (ИГАП) необходимо учитывать низкую обрабатываемость применяемых в конструкциях инструментов твердых сплавов и быстрорежущих сталей, которая во многих случаях исключает использование традиционных электрокорундовых и карбидных кругов. Инструментальное обеспечение таких ГПМ кругами из СТМ в сочетании с электрофизикохимическими методами стабилизации режущей способности гарантирует необходимый уровень производительности и качества обработки. Здесь первостепенное значение приобретают вопросы модернизации технологической подготовки производства [6], устойчивости процессов формообразования и надежности шлифовального инструмента [7].

В инструментальном производстве при эксплуатации ИГАП массовыми деталями из труднообрабатываемых материалов являются мелкозернистые кольца, диски, втулки, обрабатываемая поверхность которых имеет цилиндрическую или коническую форму. Исходя из содержания процесса формообразования, при подготовке производства определяется оптимальная структура схемы обработки таких изделий и принцип управления режимными параметрами съёма припуска [7].

Для врезных схем шлифования с большой долевой подачей $S_d \approx 1$, для которых преобладающим фактором, вызывающим неравномерность износа образующей круга, является изменение износостойких свойств шлифовального круга по его высоте и неоднородность изнашивающих свойств обрабатываемого материала, в качестве принципа управления режимными параметрами процесса обработки предложена такая организация процесса формообразования, при которой все элементарные сечения детали будут последовательно проходить через весь ряд элементарных сечений круга и каждое элементарное сечение круга станет функционировать в стационарных или квазистационарных условиях, а их совокупность сохранит некоторую устойчивую форму. Этот принцип выполняется в том случае, если обрабатываемое изделие совершает относительно круга продольное движение только в установленном направлении, деление припуска осуществляется между элементарными сечениями круга, которые расположены в порядке возрастания радиусов сечений. В условиях однократного врезного шлифования режимная производительность единичного участка профиля описывается следующим ограничением [7]:

$$Q_{y\partial.m} = \pi \cdot d \cdot S_{np} \cdot \frac{\partial H(x, \tau)}{\partial x} \quad (1)$$

где d – диаметр обрабатываемой поверхности;

S_{np} – продольная подача;

$H(x, \tau)$ – функция ординат поперечного профиля круга.

Формообразование рабочей поверхности инструмента при однократной врезной схеме шлифования кругами из СТМ на металлических связках происходит под влиянием взаимосвязанных процессов автогенерации макрогеометрии (эволюции макроформы под действием установившихся процессов износа) и дозированного воздействия дополнительной электрической энергии на связку круга. Причем интенсивность этого воздействия устанавливается минимально допустимой и определяется экспериментально при эквидистантном расположении относительно образующей круга катодной поверхности автономного устройства. Устойчивая форма макрогеометрии в этом случае – результат установления на совокупности зёрен баланса между нагрузкой с учётом её распределения и режущими элементами, динамической прочностью зёрен и силой алмазоудержания. Макрогеометрия поперечного профиля рабочей поверхности инструмента определяется в процессе автогенерации, математическое описание которого основывается на методах условной аналогизации [7].

При энергетическом подходе к моделированию в общем балансе энергозатрат в изолированной системе выделяется идущая на износ – формообразование шлифовального круга – энергия автогенерации. В процессе шлифования происходит превращение этой энергии. Первоначально содержащаяся в припуске энергия на обработку в потенциальном виде U_z при съёме материала поглощается участками рабочей поверхности круга и, таким образом, осуществляется превращение $U_z \rightarrow U_n$. Здесь движение детали можно представить в виде процесса переноса и превращения энергии автогенерации вдоль моделирующего стержня, длина которого равна ширине круга B . Элементарные участки профиля круга шириной dx образуют систему взаимосвязанных звеньев, для которых превращение энергии автогенерации подчиняется аддитивному закону:

$$\Delta U_z = \sum U_{n,i} - \Delta U_{z\text{ оcm}}, \quad (2)$$

где ΔU_z – потенциальная энергия автогенерации,

$\Sigma U_{n,i}$ – прирост энергии автогенерации по i -м элементарным участкам;

$\Delta U_{z\text{ ост}}$ – остаточная энергия автогенерации.

Мерой энергетического взаимодействия обрабатываемого материала с абразивной поверхностью служит функция ординат профиля $H(x, \tau)$, представляющая собой изохрону процесса энергопереноса. С учётом равенств (1) и (2) предполагается, что плотность потока энергии автогенерации $\vec{U}_h$ пропорциональна градиенту функции $H(x, \tau)$:

$$|\vec{U}_h| = -x \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3)$$

где $x(H)$ – удельная проводимость энергии автогенерации.

При упругих отжатиях в технологической системе выражение (3) усложняется и приобретает вид:

$$|\vec{U}_h| = -x \frac{\partial H}{\partial x} - \tau_r \frac{\partial \vec{U}_h}{\partial \tau} \quad (4)$$

где τ_r – время релаксации.

Дифференциальное уравнение для нестационарного потока энергии автогенерации имеет вид:

$$q(H) \left[\frac{\partial H}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 H}{\partial \tau^2} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[x(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad (5)$$

где $q(H)$ – удельная энергоёмкость процесса автогенерации.

Удельные характеристики $q(H)$ и $x(H)$ из выражения (5) определяются расчетно-экспериментальными методами. Предельные значения $x_0 = x(H)$ и $q_0 = q(H)$ обусловлены износом круга при скольжении детали по рабочей поверхности. При численном решении уравнения (5) в конечно-разностной форме определяется совокупность последовательных макропрофилей круга через фиксированные промежутки времени [7]. Площадь поперечного сечения изношенного слоя равна:

$$S_n = \int [H_k(x) - H_0(x)] dx, \quad (6)$$

где $H_0(x)$, $H_k(x)$ – начальная и конечная ординаты поперечного профиля.

В качестве критерия оптимизации в работе [7] принят минимум технологической себестоимости, для которого формируется комплекс технических ограничений.

Требования по устойчивости процесса шлифования накладывают дополнительные ограничения на область возможных сочетаний режимных и геометрических параметров, подлежащих оптимизации. Отличительной особенностью абразивной обработки является вероятностная взаимосвязь между параметрами выражения (6), что обусловливается во многом стохастической природой шлифовального инструмента. Такой многомерный векторный случайный процесс описывается уравнением:

$$\vec{R}_m(\tau) = L(\vec{V}_k(\tau), \vec{\Omega}_n), \quad (7)$$

где $\vec{R}_m(\tau) = (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m)$ – вектор структурных параметров процесса (точность, шероховатость поверхности);

$\vec{V}_k(\tau) = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_k)$ – вектор управляющих режимных параметров;
 $\vec{W}_n(\tau) = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n)$ – вектор неуправляемых случайных параметров;
 L – оператор вероятностной связи.

Уравнение (7) используется для определения детерминированных и вероятностных ограничений для задачи стохастической оптимизации по критерию технологической себестоимости.

Оптимизация технологических процессов шлифования в составе ГПС включает три основных этапа [8]:

- оптимизацию в контуре САПР параметров шлифовального круга и технологических режимов шлифования по заданным критериям качества на основе разработанных математических моделей протекающих процессов;

- отладку (настройку) технологии на оптимальный режим функционирования на основе регрессионных уравнений, полученных на основе методов планирования эксперимента на основе натурных испытаний;

- управление тепловыми режимами в процессе работы на основе программно-технического комплекса, обеспечивающего обратную связь от малоинерционной микротермопары к устройству управления на базе микроЭВМ с использованием решения обратной задачи теплопроводности для идентификации граничных условий теплообмена.

А.П. Фалалеев [9] предложил оптимизировать процесс электроэрозионного шлифования на основе имитационной модели обработки с учетом вероятностного подхода к процессу удаления материала в результате работы эрозии и абразива. Общая вероятность удаления материала в результате совместных механических и эрозионных воздействий представляется в таком виде:

$$P(M \cdot \Xi) = 1 - P(\bar{M}) \cdot P(\bar{\Xi}),$$

где $P(\bar{M})$ – вероятность неудаления материала в результате воздействия абразивных зёрен;

$P(\bar{\Xi})$ – вероятность эрозионного неразрушения материала.

Используемый в практике шлифования прецизионных поверхностей ответственных изделий (инструментальной оснастки, приборов авионики, гидроавтоматической аппаратуры и т.п.) принцип оптимизации управления режимами операции шлифования состоит в выравнивании системой управления подачи круга относительно её номинального значения (на основе адаптивного регулирования) как на этапе чернового, так и на этапе чистового шлифования.

Главным достоинством такого практического подхода является заметное, а зачастую и существенное, уменьшение нестационарных фаз в цикле автоматического управления как на этапе чернового, так и на этапе чистового шлифования по сравнению с традиционными циклами обработки.

В работе [10] рассматривается процесс алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов кругами на металлических связках с автономным управлением режущим рельефом круга. Способ шлифования СТМ с управлением режущим рельефом круга позволяет трансформировать процесс шлифования в диапазоне от производительного до прецизионного и ультрапрецизионного. Во всех случаях для оптимизации характеристик круга и режимов обработки предлагается использовать в качестве критерия оптимизации нагрузку на единичное зерно P_z . На основании введения указанного критерия предложена схема расчёта оптимальных условий шлифования СТМ. Согласно этой

схеме для производительного шлифования нагрузка на единичное зерно должна быть достаточной для его самозатачивания у вершины (в зоне контакта).

Для определения величины действующей на зерно нагрузки и характера распределения контактного давления решается задача динамического (ударного) взаимодействия зерна с поверхностью СТМ. Для прецизионного шлифования нагрузка на зерно должна быть меньше величины его самозатачивания, т.е. должен иметь место процесс истирания зерна и СТМ. При этом число зёрен в контакте с СТМ ограничивается предельно допустимой температурой шлифования, исключающей его растрескивание. Рабочая высота зёрен h_p должна обеспечивать участие в работе всех зёрен, т.е. коэффициент участия зёрен $K_y \geq 1$. Эта высота обеспечивается соответствующей интенсивностью дозируемого удаления связки [10].

При шлифовании труднообрабатываемых материалов часто формируются зоны высокого термического воздействия, обусловленные большим тепловыделением и трудностями рассеивания тепла внутри заготовки во время процесса обработки. В этих зонах возникают дефекты, которые ухудшают качество изделия [11].

Силы шлифования и температуры обычно изучаются по отношению к зонам высокого термического влияния. Однако их экспериментальная оценка или аналитический расчет могут оказаться трудоемкими и дорогостоящими. В работе [11] для прогнозирования сил и температур шлифования использованы статистические методы и методы мягких вычислений, а именно регрессионные модели, дополненные анализом дисперсии, и искусственные нейронные сети. Оба инструмента моделирования оказались «довольно успешными», прогнозируя с высокой точностью силы и температуры.

При использовании линейных регрессионных моделей авторами было доказано, что модель первого порядка дает плохие результаты, учитывая сложность решаемой проблемы. Впоследствии были построены регрессионные модели второго порядка. Эти модели показали лучшие результаты и более высокую способность адекватно прогнозировать производительность шлифования. Дисперсионный анализ также использовался для оценки эффективности моделей при расчете сил и температур шлифования [11].

Для прогнозирования сил шлифования и максимальной температуры в зоне резания были построены искусственные нейронные сети. Архитектура и параметры сетей были определены путем тестирования различных моделей и сравнения их результатов. Для обучения программы нейронной сети использовался алгоритм Левенберга-Марквардта и результаты такого подхода показали очень хорошую сходимость с экспериментальными данными [11].

Таким образом, на основе применения статистических методов и методов мягких вычислений силы и температуры шлифования успешно прогнозируются, а результаты такого прогнозирования могут быть использованы для оптимизации процесса обработки инструментальных материалов.

В работе [12] В.А. Федорович для оценки эффективности процесса алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов применил коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зёрен K_u , который в данном случае является критерием оптимизации процесса:

$$K_u = \frac{V_d}{V_z} \quad (8)$$

где V_d – объём диспергированных зёрен;

V_z – объём всех израсходованных зёрен.

Для оценки вклада материала связки в износ круга изнашивание алмазного инструмента при шлифовании постулируется как непрерывный процесс происходящих с различной вероятностью двух равновероятных, несовместимых и независимых случайных событий – диспергирования активных зёрен, т.е. их микровыкрашивания и выкрашивания, и вырывание зёрен из связки в результате когезионного и (или) адгезионного разрушения границы контакта «зерно-связка». Вероятность разрушения связки, т.е. вырывания из неё зёрен:

$$P_e = \frac{V_e}{V_z} = \frac{1}{e} \quad (8)$$

где V_e – объём выпавших из связки зёрен;

V_z – объём разрушенных зёрен в алмазоносном слое.

Тогда вероятность другого несовместимого случайного события – диспергирования активных зёрен основной фракции – составляет:

$$P_d = 1 - e^{-1} \quad (9)$$

Соотношение вероятностей P_d и P_e , описываемых выражениями (9) и (8), количественно характеризует механизм изнашивания рабочего слоя круга как многокомпонентной системы.

Для оценки влияния физико-механических свойств алмазных зёрен на изнашивание инструмента В.А. Федорович [12] ввёл новое понятие – удельный износ, который представляет собой отношение объёмов разрушенных алмазных зёрен к объёму снятого обрабатываемого материала:

$$q_u = \frac{V_z}{V_{СТПМ}} = \frac{(d_z - h_{кр} - h_{св})^3}{d_z^3} \quad (10)$$

где $V_{СТПМ}$ – объём разрушенного в процессе шлифования сверхтвёрдого поликристаллического материала (СТПМ);

d_z – средний размер зёрен;

$h_{кр}$ – критическая величина заделки зерна в связку;

$h_{св}$ – величина микронеровностей связки.

Величина q_u определяется экспериментально. Способ оценки влияния материала связки на износ круга основан на его разделении на составляющие доли – за счёт диспергирования активных зёрен q_d и за счёт разрушения связки q_e – пропорционально соответствующим вероятностям (9) и (8):

$$\frac{q_d}{q_e} = \frac{P_d}{P_e} = e^{-1}$$

По экспериментальным значениям величин e и q_u , зная, что $q_u = q_d + q_e$, и используя уравнение (10), можно количественно оценить в первом приближении вклад материала связки в износ круга, что позволяет управлять им или его прогнозировать.

2. Минимизация непроизводительного расхода инструмента

В работе [12] на основе рассмотрения физической сущности процесса изнашивания алмазного инструмента предложен принцип обеспечения минимального расхода алмазных зёрен, не осуществляющих полезную работу. Если осуществлять управляемый процесс шлифования с оптимальной рабочей высотой зёрен h_p , равной величине микронеровностей связки $h_{св}$, то это исключает контакт связки с СТПМ и, соответственно, практически исключает выпадение из связки неработающих зёрен, что ведёт к уменьшению непроизводительного расхода СТПМ.

Поскольку при обработке таких инструментальных материалов как твердые сплавы и некоторые другие материалы явление засаливания межзеренного пространства на РПК отсутствует, то электроэрозионные управляющие воздействия на рабочую поверхность круга мы предлагаем ограничить по силе тока, достаточной для перевода наиболее выступающих зёрен из устойчивого состояния в неустойчивое. При этом основной целью электроэрозионных воздействий является удаление необходимого объема металлической связки.

Ещё один эффективный путь снижения непроизводительного расхода дорогостоящих алмазных зёрен предлагается рядом исследователей – это определение оптимальной концентрации алмазов в круге, обеспечивающей достаточную производительность обработки при минимальном расходе алмазных зёрен [13].

Методика выбора концентрации алмазов исходя из прочностных свойств обрабатываемого и инструментального материалов предложена в группе изобретений, относящихся к конструктивным решениям шлифовального инструмента. Например, концентрация алмазных зёрен в алмазном шлифовальном круге может быть определена из соотношения:

$$K = 25 \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

где σ_1 – предел прочности на сжатие шлифуемого СТМ;

σ_2 – предел прочности на сжатие алмазных зёрен круга.

Для определения оптимальной или рациональной концентрации алмазных зёрен могут использоваться также и другие физико-механические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов.

Подход, состоящий в индивидуальном выборе концентрации алмазов, оправдан на предприятиях с производством больших объёмов однотипной продукции. В производствах с низкими коэффициентами серийности он малоприменим, так как в предельном случае использование такого подхода сведется к индивидуальному подбору характеристик шлифовального круга не только для каждой марки обрабатываемого материала, но и для каждого вида обрабатываемых изделий.

В дополнение к этому в работе [13] учитываются также прочностные свойства связки. Здесь рассматривается взаимосвязь рабочей высоты зёрен над уровнем связки и концентрации зёрен как дополняющих друг друга параметров, принимающих участие в обеспечении оптимального сочетания производительности, себестоимости и качества обработки. Расчёт оптимальной концентрации алмазов ведется исходя из условия, чтобы на алмазных зёрнах круга в процессе их работы не образовывались плоские площадки износа, тормозящие процесс шлифования. Зёрна должны иметь возможность самозатачиваться с образованием субмикрочастиц.

С течением времени обработки СТМ зёрна инструментального материала с образовавшимися площадками износа удерживают на себе всю нагрузку, не давая воз-

можность вступить в работу новым острым зёрнам. Такие зёрна необходимо либо удалить из связки, либо заставить их хрупко самозатачиваться, увеличив нагрузку в контакте «зерно-СТМ» при той же рабочей высоте зёрен.

В первом случае вопрос решается электроэрозионным или электрохимическим удалением металлической связки. Однако практическая реализация этих способов воздействий на алмазный круг при шлифовании СТМ показала, что они неэффективны с точки зрения себестоимости, так как большое количество зёрен выпадает из связки, либо вообще не принимая участия в шлифовании, либо с очень низким коэффициентом использования своих режущих свойств [13].

Во втором случае происходит чрезмерное возрастание общей нагрузки на обрабатываемый СТМ. А поскольку предел прочности алмазных зёрен, как правило, выше, чем обрабатываемых сверхтвёрдых материалов в силу большей дефектности последних, то до наступления момента самозатачивания зёрен может происходить либо макрорастрескивание обрабатываемого СТМ, либо образование на его поверхности сетки микротрещин. Чем большую площадь занимают зёрна на РПК, т.е. чем больше их концентрация, тем вероятнее макроразрушение СТМ, приводящее к браку шлифованной поверхности.

При 100%-й концентрации алмазов не представляется возможным увеличить нагрузку, необходимую для разрушения зёрен, без разрушения СТМ. Это свидетельствует о том, что концентрация алмазных зёрен в применяемых алмазных шлифовальных кругах намного превышает оптимальную. Это проявляется в возможности обеспечить одну и ту же опорную площадь поверхности круга t_{pi} при работе кругами с различной концентрацией.

Таким образом, алгоритм определения оптимальных условий шлифования СТМ, представленный Н.В. Козаковой и В.А. Федоровичем в работе [13], выглядит следующим образом. При 3D-моделировании контакта единичного зерна с поверхностью СТМ методом конечных элементов определяются оптимальные условия интенсивного съёма припуска для данной марки обрабатываемого материала – марка алмазного зерна, зернистость, скорость шлифования, давление в контакте. Определив через режимы нагрузки на единичное зерно, достаточную для его самозатачивания, задаётся минимальная высота зёрен, исключаяющая их контакт с обрабатываемой поверхностью. Рассчитывается максимально допустимая нагрузка на шлифуемый образец, не вызывающая его растрескивание, и определяется максимально допустимое число зёрен в контакте. По назначенной рабочей высоте и рассчитанному числу зёрен в контакте назначается концентрация зёрен.

Принципиальной особенностью алмазного шлифования СТМ является практическое отсутствие внедрения алмазных зёрен в обрабатываемый материал (твердости обрабатываемого и инструментального материалов одинаковы). Следовательно, в работе (в контакте) будут находиться только максимально выступающие зёрна (точнее, вершины зёрен, находящиеся в диапазоне их вдавливания в связку [14]. При этом расходоваться при работе шлифовального инструмента будут не только работающие зёрна, но и такие, у которых нет контакта с поверхностью обрабатываемого материала, но возможно взаимодействие с микростружками, продуктами износа, обломками других зёрен и т.п.

Один из путей преодоления отмеченных сложностей и ограничений при определении оптимальных условий шлифования инструментальных материалов предложен нами в работе [15], в которой для оптимизации процесса алмазного шлифования ваннадийсодержащих сталей используется текущая лимитированная режущая способность

шлифовального круга, описывающая изменение режущих свойств шлифовального круга во времени и являющаяся характеристикой нестационарности процесса алмазно-абразивной обработки.

Заключение

Анализ рассмотренных способов и подходов к оптимизации режимов шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов показывает, что для случая осуществления процесса шлифования без управления параметрами режущего рельефа круга, независимо от выбора критерия оптимизации, в последовательность этапов оптимизации включается получение регрессионных уравнений на основе применения методов планирования эксперимента. Если оптимизация процесса шлифования без управления параметрами РПК производится на основе использования имитационных моделей обработки, то либо сама модель строится на основе вероятностного подхода, либо она включает в себя составляющие, которые определяются опытно-экспериментальным методом.

В случае осуществления процесса шлифования с управлением параметрами режущего рельефа круга оптимизация процесса производится или на основе построения циклов обработки с использованием эталонного цикла и автоматической системы управления, или только путем использования системы управления, которая осуществляет регулирование на базе данных, полученных с помощью теоретико-вероятностных моделей, статистических методов, нейронных сетей или, при наличии такой возможности, на основе непосредственной опытной оценки состояния технологической системы.

Когда в качестве критерия оптимизации применяются показатели, характеризующие использование режущих свойств зерен СТМ или нагрузку на отдельное зерно в процессе обработки, задача оптимизации решается путём выбора характеристик инструментального материала и шлифовального круга, наилучшим образом подходящих для пары элементов технологической системы «шлифовальный инструмент – обрабатываемая заготовка» при заданных технических ограничениях на процесс обработки. Такой подход оправдан только в массовом и крупносерийном производстве, где возможно затратить достаточно большие средства на технологическую подготовку производства, в частности на его инструментальное обеспечение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Узунян, М. Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твёрдых сплавов путём прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов: Автореф. дис.... докт. техн. наук: 05.03.01 / Матвей Данилович Узунян; Мосстанкин. – Москва, 1989. – 40 с.
2. Brinksmeier, E. Modelling and optimization of grinding processes / E. Brinksmeier, H. K. Tönshoff, C. Czenkusch, C. Heinzel // Journal of intelligent manufacturing. – 1998. – No. 9 (4). – P. 303-314.
3. Ненашев, М. В. Методология выбора режимов шлифования / М. В. Ненашев, В. В. Борисов, В. Н. Воронин [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4-2. – С. 387-390.
4. Никитков, Н. В. Расчет режимов резания при алмазном шлифовании заготовок из твердых хрупких материалов / Н. В. Никитков, Н. Ю. Ковеленов, Д. Н. Шабалин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2012. – Вып. 4. – С. 162-167.

5. Сидоров, Д. Е. Анализ математических моделей абразивно-алмазной обработки материалов для синтеза САУ ТП чистового шлифования / Д. Е. Сидоров // Вестник Севастопольского НТУ: Сб. научных трудов. Серия: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – Выпуск 150/2014. – С. 146-152.

6. Vodolazskaya, N. V. Types and ways of modernization in a context of the international experience / N. V. Vodolazskaya // Virtual Economics. – 2019. – Vol. 2, No. 1. – P. 81-93.

7. Дудукалов, Ю. В. Оптимизация условий автоматизированной абразивной обработки кругами из СТМ некоторых деталей инструментального производства / Ю. В. Дудукалов, А. Ф. Раб // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Основа. – 1991. – Вып. 46. – С. 31-34.

8. Четкарев, В. А. Комплекс для разработки, настройки и управления технологическими процессами алмазного шлифования в составе ГПС / В. А. Четкарев, В. А. Сипайлов, Г. Х. Юсупов [и др.] // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Основа. – 1991. – Вып. 46. – С. 48-50.

9. Фалалеев, А. П. Вероятностный подход при имитационном моделировании электроэрозионного шлифования / А. П. Фалалеев // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Основа. – 1998. – Вып. 52. – С. 205-208.

10. Федорович, В. А. Моделирование управляемого процесса шлифования сверхтвёрдых материалов / В. А. Федорович, А. Мамалис // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Основа. – 1999. – Вып. 55. – С. 214-219.

11. Karkalos, Nikolaos E. Application of Statistical and Soft Computing techniques for the Prediction of Grinding Performance / Nikolaos E. Karkalos, Angelos P. Markopoulos, Michael F. Dossis // Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research. – 2015. – No. 1(2). – P. 6-16.

12. Федорович, В. А. Анализ эффективности использования алмазных зёрен при шлифовании сверхтвёрдых материалов / В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 235-243.

13. Козакова, Н. В. Влияние прочностных свойств элементов системы «круг-деталь» на оптимальную концентрацию алмазных зёрен / Н. В. Козакова, В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 2003. – Вып. 64. – С. 133-140.

14. Федорович, В. А. Пути повышения эффективности алмазного шлифования СТПМ / В. А. Федорович, С. А. Гринько // Машиностроение: Вестник Харьковского гос. политех. ун-та. Сб. научных трудов. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 100. – С. 188-192.

15. Полтавец, В. В. Оптимизация процесса алмазного шлифования ванадиевых сталей с периодическими электроэрозионными управляющими воздействиями / В. В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Вып. 3(86)'2024. – Донецк: ДонНТУ, 2024. – С. 45-56.

REFERENCES

1. Uzunyan, M. D. Increase the efficiency of diamond grinding of hard alloys by predicting and stabilizing the workability of wheels: Abstract of the diss. of doctor of engineering: 05.03.01 / Matvey Danilovich Uzunyan; Mosstankin. – Moscow, 1989. – 40 p.

2. Brinksmeier, E. Modelling and optimization of grinding processes / E. Brinksmeier, H. K. Tönshoff, C. Czenkusch, C. Heinzl // *Journal of intelligent manufacturing*. – 1998. – No. 9 (4). – P. 303-314.
3. Nenashev, M. V. Grinding conditions selection methodology / M. V. Nenashev, V. V. Borisov, V. N. Voronin [et al.] // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2013. – Vol. 15. – No. 4-2. – P. 387-390.
4. Nikitkov, N. V. Calculation of cutting conditions for diamond grinding of workpieces made of hard brittle materials / N. V. Nikitkov, N. Yu. Kovelonov, D. N. Shabalin // *Scientific and technical statements of SPbPU. Science and Engineering*. – 2012. – Issue 4. – P. 162-167.
5. Sidorov, D. E. Analysis of mathematical models of abrasive-diamond machining of materials for the synthesis of final grinding APCS / D. E. Sidorov // *Bulletin of Sevastopol NTU: Coll. of scientific works. Series: Machine-instrument building and transport*. – Sevastopol: SevNTU, 2014. – Issue 150/2014. – P. 146-152.
6. Vodolazskaya, N. V. Types and ways of modernization in a context of the international experience / N. V. Vodolazskaya // *Virtual Economics*. – 2019. – Vol. 2, No. 1. – P. 81-93.
7. Dudukalov, Yu. V. Optimization of conditions for automated abrasive machining with wheels from SHM of some parts of tool production / Yu. V. Dudukalov, A. F. Rab // *Cutting and tool. Republic. interdepartmental scientific and technical coll.* – Kharkov: Osnova. – 1991. – Issue 46. – P. 31-34.
8. Chetkarev, V. A. Complex for development, adjustment and control of diamond grinding processes as a part of FMS / V. A. Chetkarev, V. A. Sipaylov, G. H. Yusupov [et al.] // *Cutting and tool. Republic. interdepartmental scientific and technical coll.* – Kharkov: Osnova. – 1991. – Issue 46. – P. 48-50.
9. Falaleyev, A.P. Probabilistic approach in simulation of spark-erosion grinding / A.P. Falaleyev // *Cutting and tool. Republic. interdepartmental scientific and technical coll.* – Kharkov: Osnova. – 1998. – Issue 52. – P. 205-208.
10. Fedorovich, V. A. Modeling the controlled grinding process of superhard materials / V. A. Fedorovich, A. Mamalis // *Cutting and tool. Republic. interdepartmental scientific and technical coll.* – Kharkov: Osnova. – 1999. – Issue 55. – P. 214-219.
11. Karkalos, Nikolaos E. Application of Statistical and Soft Computing techniques for the Prediction of Grinding Performance / Nikolaos E. Karkalos, Angelos P. Markopoulos, Michael F. Dossis // *Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research*. – 2015. – No. 1(2). – P. 6-16.
12. Fedorovich, V. A. Analysis of the efficiency of using diamond grains in grinding superhard materials / V. A. Fedorovich // *Cutting and tools in process systems. International Scientific and Technical Coll.* – Kharkov: KhSPU, 2001. – Issue 60. – P. 235-243.
13. Kozakova, N. V. Influence of the strength properties of the elements of the «wheel-part» system on the optimal concentration of diamond grains / N. V. Kozakova, V. A. Fedorovich // *Cutting and tools in process systems. International Scientific and Technical Coll.* – Kharkov: KhSPU, 2003. – Issue 64. – P. 133-140.
14. Fedorovich, V. A. Ways to increase the efficiency of diamond grinding SHPM / V. A. Fedorovich, S. A. Grinko // *Mechanical Engineering: Bulletin of Kharkov State Polytechnic University. Coll. of scientific papers*. – Kharkov: KhSPU, 2000. – Issue 100. – P. 188-192.
15. Poltavets, V.V. Optimization of the process of diamond grinding of vanadium steels with periodic spark-erosion control actions / V.V. Poltavets // *Progressive technologies and mechanical engineering systems: International coll. of scientific papers*. – Issue 3(86)'2024. – Donetsk: DonNTU, 2024. – P. 45-56.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this paper. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 30.03.2026.

The article was submitted March 6, 2026; approved after reviewing March 18, 2026; accepted for publication March 30, 2026.