

## Моделирование взаимодействия единичного абразивного зерна с поверхностью детали

*И.Г. Лымарев<sup>1</sup>, М.В. Даниленко<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет*

*<sup>2</sup>Волжский политехнический институт*

**Аннотация:** В статье представлен обзор по различным подходам, используемым для моделирования контактного взаимодействия между зерном шлифовального круга и поверхностным слоем детали в процессе шлифования. Понимание этих взаимодействий имеет решающее значение для оптимизации производительности шлифования, улучшения качества отделки поверхности и продления срока службы инструмента. В обзоре рассматриваются экспериментальные методы, разработанные для описания сложной механики контакта зерна с поверхностью, включая силы, температуры и механизмы износа. Кроме того, изучается влияние свойств материала, параметров шлифования и морфологии зерна на процесс контакта.

**Ключевые слова:** Шлифование, зерно, зона контакта, моделирование, шлифовальный круг, индентор, микрорезание, глубина резания.

Шлифование представляет собой финишную технологическую операцию, применяемую для достижения требуемой шероховатости поверхности и прецизионных геометрических характеристик изделия [1]. Этот процесс реализуется путем высокоскоростного взаимодействия абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, что приводит к микроскопическому удалению материала заготовки. Рассматривая данный процесс на микроуровне, можно констатировать, что сьем обрабатываемого материала и формирование микрорельефа поверхности осуществляется в результате сложного пространственного взаимодействия большого числа единичных абразивных зерен рабочей поверхности шлифовального круга с приповерхностным слоем заготовки. Данное взаимодействие характеризуется интенсивными деформационными,

---

адгезионно-когезионными и тепловыми процессами, локализованными в субмикроскопических областях контакта отдельных зерен и материала [2,3]. Закономерности протекания этих процессов в конечном итоге определяют как интегральные параметры результата обработки (производительность, точность, качество поверхности), так и ресурс режущего инструмента [4].

В связи с этим, центральной задачей в теоретическом исследовании технологии шлифования является построение адекватных математических моделей единичного акта взаимодействия "абразивное зерно - обрабатываемый материал", количественно описывающих механизмы съема припуска и диссипации энергии, эволюцию напряженно-деформированного и теплового состояния контактирующих тел, условия износа и потери режущей способности элементарной неровности рабочей поверхности инструмента [5,6]. Корректный учет максимально широкого спектра физических явлений, сопровождающих рассматриваемый процесс, при сохранении приемлемого уровня сложности является необходимым условием обеспечения достоверности получаемых теоретических результатов и возможности их практического использования для научно обоснованного выбора рациональных режимов обработки, характеристик инструмента и технологической среды.

На сегодняшний день исследователями предложен ряд подходов к моделированию контактного взаимодействия зерна шлифовального круга с поверхностным слоем детали. Эти подходы реализуют различные теоретические концепции и вычислительные методы - от аналитических микромеханических моделей до численного анализа методом конечных элементов. Обобщая результаты современных исследований в данном направлении, представленные в работах [1,3,6], можно констатировать многообразие теоретических подходов и методов моделирования, реализованных авторами.

---

Одним из распространенных теоретических подходов к изучению микроуровня процесса шлифования является геометро-статистическое представление профиля единичной риски, формируемой вершиной зерна, внедрившейся в обрабатываемый материал на фиксированную глубину. Широков А.В. и Осипов А.П. [6] предложили аналитическую модель для расчета высотных и шаговых параметров шероховатости шлифованной поверхности, базирующуюся на геометрическом анализе профиля единичной риски с привлечением закономерностей пластического деформирования металла. Ключевая идея разработанного подхода состоит в установлении функциональной связи между глубиной внедрения абразивного зерна, объемом вытесненного в стороны материала и геометрией образующихся по краям риски навалов. Уравнение для максимальной высоты микронеровностей  $R_{\max}$  записывается в виде суперпозиции глубины канавки  $t_k$  (принимаемой равной максимальной толщине среза  $a_{z\max}$ ) и высоты наиболее развитого навала  $h_{\text{нmax}}$ . Последняя величина определяется из решения вариационной задачи о деформации полупространства эквивалентным сосредоточенным индентором, моделирующим режущую кромку зерна. Форма индентора описывается степенной функцией  $f(y) = by^v$ , коэффициенты которой идентифицируются по результатам аппроксимации экспериментальных профилограмм методом наименьших квадратов. Оригинальным элементом модели является учет износа режущих кромок зерен путем введения величины линейного износа  $h_{\text{изн}}$  в зависимость для определения минимальной глубины внедрения  $y_{\min}$ , соответствующей началу процесса стружкообразования. Значение  $y_{\min}$  рассчитывается через физико-механические свойства обрабатываемого материала - предел текучести, относительное удлинение и сужение в момент разрыва. Также получены расчетные формулы, расстояния между их вершинами безразмерных комплексов - коэффициента и относительной высоты. Для верификации

---

теоретических результатов было проведено экспериментальное исследование топографии единичных рисок, сформированных на поверхности образцов из стали 45 алмазными режцовыми вставками различной геометрии при варьировании скорости микрорезания. Профилометрические измерения осуществлялись в серии равноотстоящих поперечных сечений с определением характерных геометрических параметров рисок. Сопоставление опытных и расчетных данных показало их удовлетворительное совпадение по величине высоты навалов (относительная погрешность для  $h_{\text{нmax}}$  составила 15...20%) и среднему расстоянию между вершинами. В то же время значения ширины навалов, определенные по модели, оказались заниженными на 30...50%, что связано с идеализированным представлением их профиля в виде полукруглых сегментов. Установлено наличие значительных статистических разбросов для величин коэффициента и относительной высоты навалов, обусловленных влиянием исходной шероховатости образцов и несовершенством методики определения границ навалов по профилограмме. В целом, разработанная модель представляет собой достаточно эффективный инструмент для прогнозирования качества шлифованной поверхности, учитывающий геометрию режущего рельефа инструмента, кинематические параметры процесса и физико-механические свойства обрабатываемого материала. Развитие подхода предполагается в направлении более строгого описания формы навалов и условий перехода материала в стружку.

Переладов А.Б. и Камкин И.П. [7] реализовали концепцию 3D-моделирования рабочей поверхности шлифовального круга и процесса его взаимодействия с заготовкой средствами САПР T-FLEX CAD. На первом этапе производится генерация модели рабочей поверхности в виде набора аппроксимирующих конусов, имитирующих геометрию вершин абразивных зерен. Координаты оснований конусов рассчитываются методом Монте-

---

Карло в соответствии с заданным законом распределения вероятности (равномерное по длине и ширине, степенное по глубине рабочего слоя). Высота конусов определяется на основе данных о средней высоте выступания зерен и диапазоне разброса размеров. Угол при вершине конуса служит варьируемым параметром модели и характеризует остроту зерен. На втором этапе имитируется процесс взаимодействия полученной инструментальной поверхности с плоской поверхностью виртуальной заготовки. Учет режимов шлифования (скорости круга и детали, глубины и продольной подачи) осуществляется путем соответствующего наклона плоскости связки относительно вектора скорости резания и масштабирования модели. Результатом моделирования являются распределения сечений среза для активных (выступающих) зерен круга по глубине рабочего слоя и 2D-профилограммы обработанной поверхности, полученные для произвольного поперечного сечения. Верификация расчетных данных по критерию шероховатости не производилась, однако отмечается соответствие трендов изменения параметров  $R_{\max}$  при варьировании размера зерна и режимов шлифования известным экспериментальным закономерностям. К преимуществам предложенного подхода следует отнести его универсальность (адаптируемость к различным методам абразивной обработки), возможность расширения функциональных возможностей за счет специализированных программных модулей, высокую скорость перестроения модели при изменении входных данных, наглядность визуализации результатов. Представляется перспективным дополнение алгоритма процедурами учета изнашивания и самозатачиваемости зерен, использование САЕ-методов для моделирования напряженно-деформированного и теплового состояния в контактной зоне.

В свою очередь, Яшков В.А. [8] исследовал механизм работы абразивных зерен при внутреннем шлифовании на станке особой

---

компоновки, предусматривающей коаксиальное (соосное) расположение сборного инструмента и обрабатываемой заготовки внутри проточной емкости для подвода СОЖ. В отличие от традиционной схемы, данный способ характеризуется тем, что абразивные сегменты свободно перемещаются в радиальном направлении под действием центробежной силы и постоянно контактируют с обрабатываемой поверхностью. Возникающее при этом давление прижима и интенсивность охлаждения зоны резания определяются частотой вращения круга и конструктивными параметрами рабочих элементов. Для теоретического описания условий взаимодействия шлифовальных сегментов с материалом использован безразмерный критерий И.В. Крагельского, характеризующий соотношение между величиной относительного внедрения зерна  $a_z$  и показателем пластичности  $T$ . Здесь  $a_z$  - текущая глубина внедрения зерна (без учета упругого восстановления), - радиус округления при вершине, - предел прочности на сдвиг,  $T$  - предел текучести обрабатываемого материала. Критические значения комплекса, при которых происходит переход от преимущественно упругого деформирования поверхности (процесс выглаживания) к пластическому оттеснению и микрорезанию, были установлены из обширной базы экспериментальных данных. Глубина внедрения зерна  $a_z$  поставлена в зависимость от нормальной силы прижима сегмента, формируемой центробежным эффектом. Последняя величина определяется по известной формуле с учетом массы абразивного элемента и линейной скорости шлифования. При этом рассматривается квазистатическая модель процесса, пренебрегающая ударным характером взаимодействия и волновыми эффектами в технологической системе. Приведены расчетные значения критерия Крагельского в функции конструктивных параметров инструмента (высота и площадь опорной поверхности абразивного сегмента, размер и концентрация зерен) и режимов обработки (частота вращения круга) при

---

шлифовании стали 30ХГСА. Получены диаграммы областей реализации того или иного вида взаимодействия (упругого, пластического, микрорезания) в координатах "число оборотов круга - размер зерна". Представленные данные позволяют технологу обоснованно назначать режимы обработки, обеспечивающие максимально высокую производительность съема припуска при сохранении качества и целостности обработанной поверхности. Достоверность теоретических результатов подтверждена экспериментально путем сопоставления с реальными значениями параметров шероховатости, волнистости, величины и знака остаточных напряжений, регистрируемыми после операций внутреннего шлифования на различных режимах.

Отдельную группу исследований составляют работы, посвященные термодинамическому моделированию процесса шлифования на основе системного подхода, рассматривающие единичное взаимодействие с позиций анализа взаимосвязанной динамики тепловых, упруго-диссипативных и рабочих процессов. Так, Никитин С.П. с соавторами [9] разработали комплексную термодинамическую модель процесса абразивной обработки резиновых теплозащитных покрытий методом шлифования, учитывающую взаимовлияние переменных состояний упругой системы станка, собственно процесса резания и сопутствующих тепловых явлений. Все элементы технологической системы представлены в виде структурных блоков некоторой обобщенной эквивалентной схемы динамики, связанных между собой потоками энергии различной физической природы. Анализ процессов преобразования и рассеяния энергии в такой системе базируется на вариационных принципах термодинамики неравновесных процессов и привлечении аналогии с теорией электрических цепей. Механическая подсистема станка моделируется уравнением движения 1 порядка для каждой из ортогональных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , определяющих текущее положение центра масс шлифовального круга. В общем виде уравнения включают

---

члены, пропорциональные массе, демпфированию, жесткости и возмущающим силовым факторам (проекциям силы резания). Масштабные коэффициенты рассматриваются в качестве эффективных, учитывающих распределенный характер параметров, и идентифицируются по частотным характеристикам (АФЧХ), регистрируемым при гармоническом нагружении круга. Процесс резания-трения при микровзаимодействии единичного абразивного зерна описывается как динамическое звено с распределенными параметрами, преобразующее потоки перемещений в потоки сил. В первом приближении принята линейная модель, в которой касательная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  проекции силы резания зависят от соответствующих проекций скорости и ускорения через феноменологические коэффициенты резания и демпфирования. Последние величины рассчитываются по известным формулам теории шлифования с учетом количества активных зерен (определяемого вероятностно-статистическими методами). Для моделирования теплофизических процессов в зоне контакта использован метод электротепловой аналогии, согласно которому температурные поля представляются в виде напряжений на емкостных элементах RC-цепи, источники выделения и стока теплоты - как источники ЭДС и токов, теплопередача интерпретируется как перенос зарядов, теплопроводность и теплоемкость - как обратные величины сопротивлений и емкостей соответственно. Полученная эквивалентная тепловая схема включает 6 узловых точек, соответствующих характерным участкам контакта, которые связаны между собой тепловыми сопротивлениями. Генерируемые в зоне резания-трения элементарные потоки теплоты определяются как произведения сил и соответствующих скоростей скольжения. На основе составленной схемы и метода узловых потенциалов записана система линейных неоднородных дифференциальных уравнений 1 порядка, решаемая

---

численными методами. Результатом расчета по модели являются температуры в контрольных точках системы (на обрабатываемой поверхности, на задней поверхности зерен, на границе связки круга, в объеме СОЖ и т.д.) как функции времени и режимов обработки. Параметры модели идентифицированы по экспериментальным термограммам зоны резания, полученным методом искусственной термопары и тепловизионной съемки. Адекватность модели подтверждена сопоставлением расчетных и измеренных значений средней температуры контакта, амплитуд и фаз колебаний для различных участков. Относительная погрешность не превысила 15-20% для стационарных режимов и 25-30% в динамике. Практическая ценность разработанного подхода состоит в возможности прогнозировать тепловую напряженность процесса шлифования эластичных материалов в зависимости от условий обработки и оптимизировать режимы по критерию обеспечения заданной производительности и качества поверхностного слоя с учетом явления термомеханической деструкции полимерного связующего. Дальнейшее развитие модели предполагает детализацию описания механизмов диссипации энергии с выделением доли теплоты, аккумулируемой стружкой, учет влияния наростообразования и вибраций в зоне контакта на трибологическую ситуацию, более строгую оценку распределения потоков теплоты на микромасштабном уровне.

Наиболее перспективным, по нашему мнению, является построение модели взаимодействия абразивного зерна с поверхностью детали методом конечных элементов. Так, Ардашев Д.В. [10] исследовал НДС (напряженно-деформированное состояние) единичных абразивных зерен методом конечных элементов применительно к процессу плоского шлифования периферией круга. Геометрическая модель зерна создавалась в виде усеченного конуса, соответствующего по размерам заданной зернистости материала. Высота и угол при вершине конуса варьировались для имитации

---

различной степени износа (затупления) режущей кромки. Механические свойства абразива идентифицировались по справочным данным для белого электрокорунда, упругие характеристики обрабатываемой стали 45 задавались в функции температуры согласно известным эмпирическим зависимостям. На боковой поверхности зерна и вершине площадки износа прикладывались распределенные нагрузки, эквивалентные касательной и нормальной составляющим силы резания, определяемым из обобщенного уравнения шлифования. Расчетная область разбивалась тетраэдрическими конечными элементами. В результате статического анализа НДС были получены поля компонент тензора напряжений, главных напряжений и интенсивности напряжений в характерных сечениях абразивного зерна. Установлено, что уровень и характер распределения эквивалентных напряжений существенно зависят от остроты зерна (т.е. величины площадки износа), зернистости и температуры в зоне шлифования. Максимальные значения приведенных напряжений локализуются в области контакта вершины зерна с обрабатываемым материалом. По мере затупления зерна (роста площадки износа) происходит увеличение объема зоны высоконапряженного состояния и общего уровня действующих напряжений. Этот эффект проявляется более заметно для зерен большей зернистости. Также прослеживается тенденция снижения пиковых значений напряжений при повышении температуры в контакте, что объясняется термомеханическим разупрочнением связки круга. Сопоставление расчетных эквивалентных напряжений с величиной предела прочности абразивного материала позволило сформулировать критерий объемного разрушения зерен и предложить соответствующую модель износа РПК (рабочей поверхности круга). Показано, что изнашивание абразивных зерен в процессе шлифования носит многостадийный характер и определяется достижением предельных значений силового и теплового нагружения на различных масштабных

---

уровнях. Предложенная методика численного моделирования НДС позволяет рационально выбирать оптимальные сочетания физико-механических свойств абразивного инструмента и режимов обработки по критерию обеспечения максимальной стойкости РПК в заданных условиях эксплуатации. В аналогичных исследованиях для описания кинематического механизма движения деформируемой сплошной среды сетки материала предлагается также использовать подход Лагранжа – Эйлера.

Как видно, анализ современной научно-технической литературы свидетельствует о значительном прогрессе в развитии методологии моделирования единичных актов взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом. Разработан обширный математический аппарат, позволяющий с достаточной для инженерной практики точностью описывать геометрические, кинематические, динамические и энергетические аспекты контактных явлений, реализующихся на микромасштабном уровне при абразивной обработке. Показано, что процесс микрорезания единичным зерном является многофакторным, стохастическим и существенно нелинейным. Его результирующие параметры (толщина среза, сила резания, интенсивность тепловыделения, шероховатость риски и т.п.) зависят от комплекса конструктивных, технологических и физических факторов, часть из которых носит неконтролируемый характер. В этой связи актуальной является проблема разработки комплексных многоуровневых моделей взаимодействия инструмента и заготовки, органично сочетающих теоретические подходы механики контактного разрушения, трибологии и теплофизики в рамках единого итерационного алгоритма. Определенные перспективы связываются с использованием аппарата клеточных автоматов, который позволяет учесть дискретную структуру РПК и моделировать ансамбль взаимодействующих абразивных зерен как самоорганизующуюся систему с внутренними адаптационными возможностями. Требуют

---

дальнейшего совершенствования методы параметрической идентификации разрабатываемых моделей на основе данных натуральных экспериментов и средств компьютерной диагностики быстропротекающих процессов в зоне шлифования. Кроме того, необходима более глубокая систематизация результатов моделирования в виде количественных взаимосвязей интегральных показателей процесса и надежных инженерных критериев выбора рациональных условий обработки различных по свойствам материалов.

### Литература

1. Rodriguez J.M., Carbonell J.M., Jonsen P. Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation. Computational Methods in Engineering. 2018. Pp. 1–26.
  2. Шипулин Л.В., Фролов А.А., Шулежко Е.И. Исследование влияния факторов процесса резания единичным абразивным зерном на микрорельеф следа на поверхности заготовки с использованием конечно-элементного моделирования проблемы машиностроения и автоматизации // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2023, №3. с. 23-31. URL: [doi.org/10.52261/02346206\\_2023\\_3\\_23](https://doi.org/10.52261/02346206_2023_3_23)
  3. Носенко В. А., Даниленко М. В., Губанов Д. А., Джафаров С. М. Методика определения координат точки приложения силы резания при шлифовании с учетом многопроходности процесса // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – No 8(267). – С. 45-48.
  4. Шипулин Л.В. Разработка методики проектирования операций высокоскоростной обработки на основе использования цифрового двойника процесса: отчет о НИР (промежуточный) // Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск: ЮУрГУ, 2022. — No 22-21-20088 ; РНФ: 01-220.
-

5. Лымарев И. Г., Даниленко М. В. Моделирование взаимодействия единичного абразивного зерна с поверхностью детали / XXVIII Межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского : материалы конференции, Волжский, 29 мая – 02 2023 года. – Волжский, 2023. – С. 157-159.

6. Широков А.В., Осипов А.П., Мансуров Р.Н. Проверка адекватности разработанной математической модели формирования шероховатости шлифованной поверхности на основе экспериментов по микрорезанию единичным абразивным зерном // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. - 2010. - № 54 . – С . 139 - 153

7. Козлов А. М. Влияние пространственной ориентации абразивного зерна на его взаимодействие с обрабатываемой поверхностью // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, No 1. – С. 144-148. – DOI 10.25987/VSTU.2020.16.1.018.

8. Яшков, В. А. Моделирование взаимодействия режущих абразивных зерен с поверхностью детали / Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12-2. – С. 403-407.

9. Rypina L., Lipinski D., Balasz B., Kacalak W., Szatkiewicz T. Analysis and Modeling of the Micro-Cutting Process of Ti-6Al-4V Titanium Alloy with single abrasive Grain // Materials. – 2020. – 13(24). – P. 35-58.

10. Ардашев, Д. В. Моделирование контактного взаимодействия абразивного зерна с заготовкой при шлифовании // Наука ЮУрГУ : Материалы 66-й научной конференции, Челябинск, 15–17 апреля 2014 года – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 1551-1558.

## References

1. Rodriguez J.M., Carbonell J.M., Jonsen P. Computational Methods in Engineering, 2018. Pp. 1–26.
2. Shipulin L.V., Frolov A.A., Shulezhko E.I. Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii, 2023, №3, pp. 23-31. URL: [doi.org/10.52261/02346206\\_2023\\_3\\_23](https://doi.org/10.52261/02346206_2023_3_23)
3. Nosenko V. A., Danilenko M. V., Gubanov D. A., Dzhafarov S. M. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2022. No 8(267). pp. 45–48.
4. Shipulin L.V. Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet. Chelyabinsk. YuUrGU, 2022. 22-21-20088.
5. Lymarev I. G., Danilenko M. V. XXVIII Mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyx uchenyx i studentov g. Volzhskogo, Volzhskij, 2023. pp. 157-159.
6. Shirokov A.B., Osipov A.P., Mansurov R.N. Texnologii v mashinostroenii, 2010. № 54 . pp . 139 - 153
7. Kozlov A. M. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2020. pp. 144-148. URL: [10.25987/VSTU.2020.16.1.018](https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.16.1.018).
8. Yashkov, V. A. Sovremennyye naukoemkie texnologii. 2018. № 12-2. pp. 403-407.
9. Rypina L., Lipinski D., Balasz B., Kacalak W., Szatkiewicz T. Materials, 2020. № 13(24). pp. 35-58.
10. Ardashev, D. V. Nauka YuUrGU: Materialy` 66-j nauchnoj konferencii, Chelyabinsk, 2014. pp. 1551-1558.

**Дата поступления: 17.11.2024**

**Дата публикации: 26.12.2024**