

На правах рукописи



Шипулин Леонид Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПЛОСКОГО
ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА НА ОСНОВЕ
КОМПЛЕКСНОГО ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА**

Специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Кошин Анатолий Александрович

кандидат технических наук,
Дьяконов Александр Анатольевич

Официальные оппоненты: **Козлов Александр Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет», заведующий
кафедрой технологии машиностроения

Василенко Юрий Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент,
технологический институт
им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО
«Госуниверситет – УНПК», директор

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет», г. Курган

Защита диссертации состоится «__» октября 2013 г., в 12:00, на заседании диссертационного совета Д212.298.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 201а главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Основным способом финишной обработки закаленных деталей являются процессы шлифования, среди которых около 27% приходится на операции плоского шлифования периферией круга.

На сегодняшний день проектирование операций плоского шлифования осуществляется по нормативным справочникам, которые являются результатом статистической обработки технологических процессов, применяемых на машиностроительных предприятиях страны до 1991 года. Несмотря на высокую практическую значимость нормативов, стоит отметить, что заложенная в них методика является укрупненной и в большей степени направлена на определение трудоемкости изготовления детали и нормирования, а не на проектирование технологии обработки. Более того, представленные в нормативах рекомендации предназначены для станков с ручным управлением и поэтому имеют особую специфику.

Основным управляющим параметром является величина радиальной подачи инструмента на двойной рабочий ход стола с заготовкой (глубина резания), определяющая количество двойных рабочих ходов. Предусматривается корректировка радиальной подачи по обеспечению бесприжоговости и достижению требуемой шероховатости. Таким образом, съем всего припуска осуществляется последовательным удалением равномерных слоев, на каждом из которых выполняются требования по бесприжоговости и шероховатости, т. е. на черновых ходах обработка проводится с заниженной радиальной подачей и не является оптимальной по производительности. Поэтому на производстве осуществляют ее доработку и адаптацию под конкретные технологические условия, в результате чего увеличивается период технологической подготовки производства. Все это в совокупности с низкой производительностью операций плоского шлифования приводит к существенным экономическим потерям.

В то же время известно, что для повышения производительности операций круглого шлифования эффективно применяются циклы, при которых весь путь инструмента к детали делится на ступени с различающейся радиальной подачей. При этом имеется возможность адаптировать цикл обработки к конкретным технологическим условиям. Поскольку при плоском шлифовании подача на двойной рабочий ход является дискретной, то управление параметрами операции возможно за счет разбиения припуска на стадии обработки и оптимизации количества рабочих ходов на каждой из них. Оптимизация возможна на основе имитационной модели процесса, учитывающей его разноплановые физические особенности: множественное вероятностное микрорезание, высокую теплонапряженность и упругие отжатия в технологической системе. Анализ существующих имитационных моделей показал, что различные функциональные модели процесса (по формированию шероховатости, по теплофизике, по силам резания и т. д.) характеризуются низкой взаимосвязанностью и поэтому требуют задания сложных для получения исходных данных (средняя глубина внедрения зерна, количество активных зерен, интенсивность тепловыделения).

Целесообразно использовать не несколько частных моделей, а одну – комплексную, объединяющую в себе описание механики, теплофизики и силового взаимодействия. Использование такой модели позволит перейти от задания пользователем исходных данных к их расчетному определению, уменьшив тем самым влияние пользователя на результат расчета и увеличив точность прогнозирования выходных параметров. При этом основой построения комплекса является модель механического взаимодействия, позволяющая получить данные о взаимодействии каждого абразивного зерна с поверхностным слоем заготовки на каждом рабочем ходе стола с заготовкой. Имитационные модели такого уровня на сегодняшний день отсутствуют.

Целью работы является повышение производительности операций плоского шлифования периферией круга за счет оптимизации количества рабочих ходов на стадиях обработки на основе комплексного имитационного моделирования.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Разработка имитационной геометрической модели съема припуска и формирования шлифованной поверхности.
2. Формирование комплексной имитационной модели плоского шлифования периферией круга.
3. Совершенствование методики проектирования операций плоского шлифования на основе оптимизации количества рабочих ходов на черновой, чистовой и выхаживающей стадиях обработки.

Научная новизна исследования состоит в том, что:

1. Разработана имитационная геометрическая модель формирования шлифованной поверхности и съема припуска, позволяющая получать данные о механическом взаимодействии каждого абразивного зерна на каждом рабочем ходе.
2. Разработана комплексная имитационная модель прогнозирования выходных параметров процесса плоского шлифования – микрорельефа поверхности заготовки, температурных полей и сил резания на каждом прямом и обратном рабочих ходах.
3. Разработана методика оптимизации количества рабочих ходов на стадиях плоского шлифования, заключающаяся в наложении дифференцированных технологических ограничений на каждую стадию обработки.

Практическая ценность работы определяется тем, что:

1. Разработана инженерная методика проектирования технологии обработки плоским шлифованием периферией круга, предусматривающая разделение операции на стадии с изменяющейся радиальной подачей на двойной рабочий ход стола. Методика оформлена в виде РТМ.
2. На основе комплексного имитационного моделирования разработан программный модуль, позволяющий определять минимально допустимое количество рабочих ходов на стадиях обработки.
3. Разработанный программный комплекс принят к внедрению в САПР ADEM в качестве САЕ-модуля плоского шлифования периферией круга.

Апробация. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и выставках: четвертой, пятой и шестой международных конференциях «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ)» (г. Уфа – 2010, г. Москва – 2011, г. Новосибирск – 2012); всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (г. Москва – НТТМ-2010); пятой и шестой Уральской выставке научно-технического творчества молодежи «Евразийские ворота России»; второй, третьей и четвертой научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (2010, 2011, 2012 гг.); 62, 63 и 64-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов, соискателей и магистрантов в ЮУрГУ (2010, 2011, 2012 гг.); региональной конференции «Молодежь. Наука. Инновации-2011»; пятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва – 2012 г.).

Публикации по теме. По теме работы опубликовано 14 печатных работ в виде научных статей (в том числе 4 по списку ВАК и 1 в зарубежном издании, входящем в список Scopus) и докладов на всероссийских и международных конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614009.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы (153 наименования). Работа изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 64 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические предпосылки работы

Рассматриваются существующие методики проектирования операций круглого наружного шлифования в виде циклов. Существенный вклад в этом направлении сделали Г.Б. Лурье, Ю.В. Барановский, В.Н. Михелькевич, Ю.И. Манохин, В.А. Иоголевич, П.П. Переверзев и др. В соответствии с этими методиками весь путь шлифовальной бабки в радиальном направлении к детали делится на несколько этапов: быстрого подвода до касания, ускоренного врезания, чернового и чистового шлифования. Управляющими параметрами цикла являются количество ступеней, величина снимаемой части припуска на каждой ступени и соответствующие им скорости радиальной подачи.

Приводится обзор научной литературы по математическому моделированию каждого прогнозируемого комплексной моделью выходного параметра процесса. При моделировании температурных явлений, происходящих в зоне резания, придерживаются одной из схем представления теплового источника – схемы сплошного контакта и схемы дискретного контакта. В работах Д.Г. Евсеева, А.И. Исаева, А.А. Маталина, А.Н. Резникова, С.С. Силина, М.П. Шатунова, П.И. Ящерицына и др. тепловым источником является вся геометрическая площадка контакта круга с заготовкой (сплошной контакт). Применение таких теплофизических моделей обосновано при прогнозировании возможности прижога, но при расчете сил резания является нецелесообразным в связи с потерей точности из-за усреднения. Существуют и теплофизические модели, построенные по схеме дискретного контакта, когда температурное поле формируется в результате воздействия множества следующих друг за другом тепловых источников – абразивных зерен. Построением таких моделей занимались А.А. Дьяконов, В.И. Клочко, С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Островский, С.Г. Редько и др.

Аналогично температурным полям, силы резания, возникающие при шлифовании, моделируют по двум схемам контакта: сплошной (в работах Е.Н. Маслова, П.П. Переверзева и др.) и дискретной (исследования Г.В. Бокучавы, Д.Г. Евсеева и А.Н. Сальникова, А.В. Королева, С.Н. Корчака, А.А. Маталина, В.И. Островского, С.Г. Редько, Л.И. Филимонова и др.).

Прогнозирование параметров шероховатости осуществляется в трех основных направлениях: эмпирические модели, модели шероховатости в единичном поперечном сечении и имитационное трехмерное моделирование. Разработкой эмпирических моделей, представленные в виде графиков, занимались З.И. Кремень, Е.Н. Маслов, А.Н. Резников и др. Такие модели построены на основе аппроксимации экспериментальных данных, проведенных в различных условиях, и поэтому применимы только в тех условиях, для которых они были разработаны. Расчетом параметров шероховатости в поперечных сечениях заготовки, когда выбирается единичное сечение, из него вычитаются поперечные проекции абразивных зерен и формируется микропрофиль, занимались А.В. Королев, В.И. Курдюков, С.Л. Леонов, Е.Н. Маслов, Л.Н. Филимонов. Такое моделирование является оценкой шероховатости в единичном сечении, поэтому для комплексной модели неприменимо. Модели третьего направления, строящиеся на взаимодействии трехмерного инструмента и объемной шероховатой поверхности заготовки, представлены в работах А.М. Козлов, И.Н. Ян-

кин, Ф. Хи и др. Несмотря на высокую степень приближения к реальному процессу, отсутствует возможность моделирования микрорельефа поверхности заготовки на любом рабочем ходе и его изменения в процессе обработки, а это является основным требованием для разрабатываемой методики.

Анализ существующих теплофизических и силовых моделей показал, что одна из наиболее точных имитационных моделей принадлежит А.А. Дьяконову. Тем не менее, модель не учитывает геометрию множественного микрорезания, поэтому расчеты в ней сопряжены с рядом допущений и заданием сложных для определения исходных данных. Целесообразно при разработке геометрической модели взаимодействия абразивного инструмента и заготовки отдельно рассмотреть и возможность генерирования исходных данных для теплофизической модели А.А. Дьяконова.

Модель формирования шлифованной поверхности и съема припуска

Постановка задачи. Расчетная схема модели формирования шлифованной поверхности, построенной на дискретной вероятностной схеме контакта инструмента с заготовкой, приведена на рис. 1. Поверхностный слой круга диаметром D и высотой B , в котором случайным образом располагаются абразивные зерна случайного размера, движется со скоростью круга – V_K , относительно заготовки, движущейся со скоростью V_3 . В зоне контакта абразивные зерна врезаются в поверхностный слой заготовки на различную величину, срезая при этом некоторый объем металла и оставляя шлифовальную риску. В результате наложения множества таких рисков друг на друга образуется новая, только что сформированная поверхность детали с расположенными на ней неровностями. За время рабочего хода стола с заготовкой инструмент успевает сделать несколько оборотов. На втором рабочем ходе зерна врезаются в уже обработанный материал, имеющий неровности, и формирует поверхность с отличающимся микрорельефом.

Модель абразивного зерна. На основе анализа работ, в качестве аппроксимирующей фигуры формы абразивного зерна принят эллиптический параболоид вращения:

$$z = \frac{(x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2}{b_i^2}, \quad (1)$$

где x_{0i} и y_{0i} – координаты центра абразивного зерна на развертке круга, b_i – параметр, характеризующий зернистость абразивного инструмента. Принятая аппроксимирующая фигура обеспечивает максимальное приближение и имеет возможность учета зернистости и износа зерен.

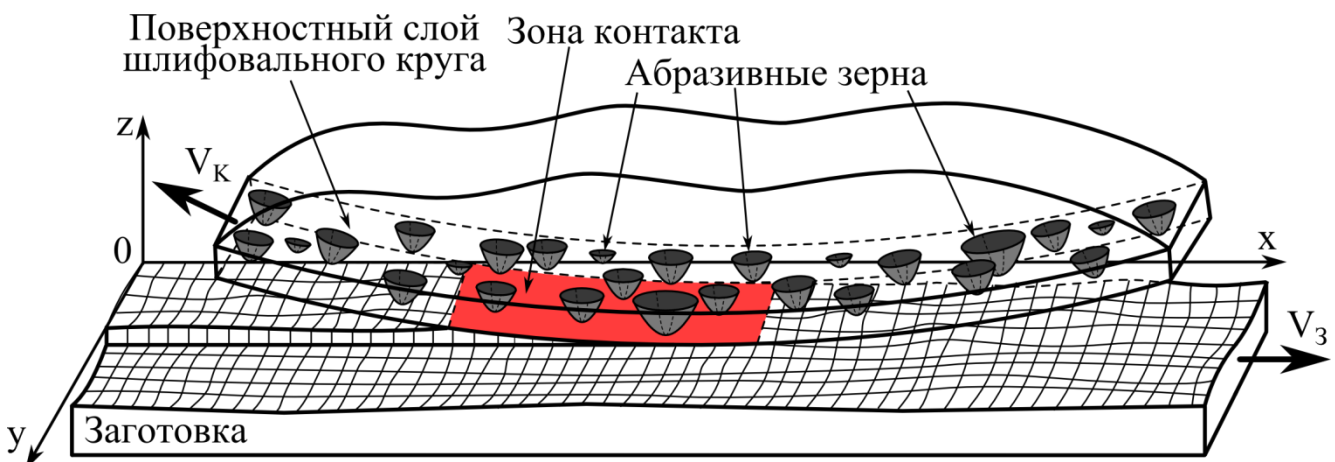


Рис. 1. Расчетная схема геометрической модели

Резание единичным зерном. С.Н. Корчаком, А.П. Осиповым, Л.Н. Филимоновым показано, что при шлифовании пластичных материалов единичное абразивное зерно оставляет риску, по боковым краям которой в результате пластического оттеснения образуются навалы. Имеются расчетные методики определения высоты этих навалов и объемов оттесненного материала. Но такие методики не позволяют описать образование навалов на негладкой шероховатой поверхности, когда зерно работает не всем режущим профилем, а лишь некоторой его частью. В то же время известно, что объем навалов составляет около 15–25% от общего объема удаленного в ходе резания материала. Причем образовавшиеся навалы срезаются последующими зернами, т. е. в конечном счете шероховатость формируется не навалами, а рисками. В силу этих причин принято решение при моделировании риски не строить навалы. Такое допущение приводит к тому, что образуемая единичным зерном поверхность риски формируется наиболее выступающей частью абразивного зерна – параболой, движущейся по окружности – периферии инструмента (рис. 2).

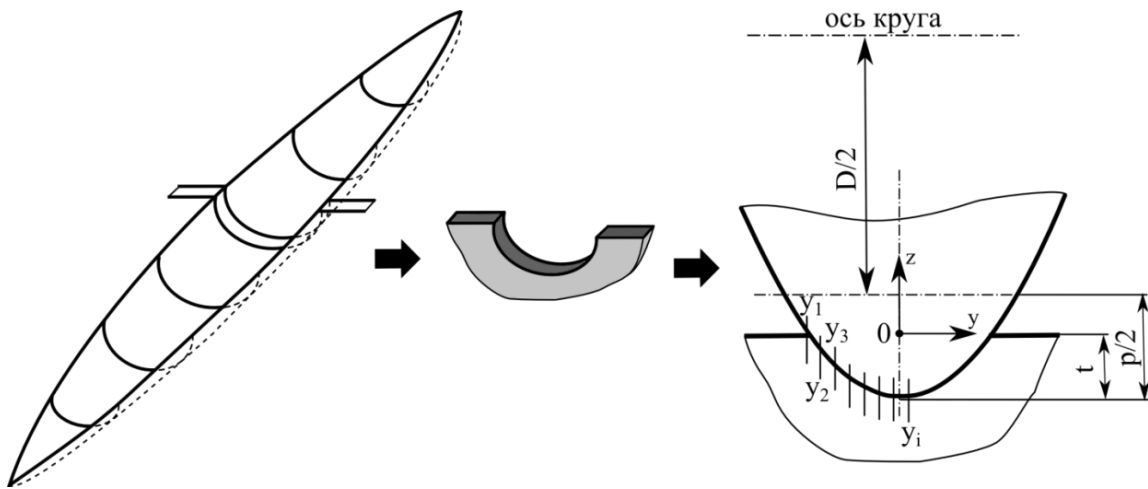


Рис. 2. Расчетная схема для определения рельефа единичной риски

Расчет поверхности риски, образованной зерном, осуществляется в два этапа: разделение риски по длине на множество сечений с шагом Δ и, исходя из высоты расположения параболы в каждом сечении, рассчитываются координаты точек параболы по высоте:

$$H(x, y) = \frac{(y - y_0)^2}{2b} + \sqrt{\left(\frac{D}{2} - t\right)^2 - (x - x_0)^2} + \frac{D}{2} + \frac{b}{2} - t, \quad (2)$$

$$x \in \left(x_0 - \frac{l}{2}; x_0 + \frac{l}{2}\right), \quad y \in \left(y_0 - \frac{c}{2}; y_0 + \frac{c}{2}\right).$$

Поверхность детали представляется матрицей высот $H(p \times q)$, где p и q – размерность сетки детали. Аналогичным образом, в виде матрицы высот $H^k(n \times m)$, где n и m – размер сетки поверхности риски, представлена поверхность, каждый элемент которой есть высота узла поверхности риски от k -го абразивного зерна. Вычитание объема снятого металла из объема поверхностного слоя обрабатываемой заготовки заключается в сравнении высот расположения узлов поверхности заготовки и образованной поверхности риски. Математически это представлено сравнением элементов матрицы поверхности заготовки и матрицы поверхности риски:

$$h_{ij} = \begin{cases} h_{ij} & h_{ij} \leq h_{ij}^k; \\ h_{ij}^k & h_{ij} > h_{ij}^k; \end{cases} \quad i \in (0; p); \quad j \in (0; q). \quad (3)$$

При этом операция вычитания сопровождается расчетом слоя снятого металла, который представлен матрицей $V^k(n \times m)$. Каждый элемент этой матрицы есть толщина слоя металла, на который в данном узле уменьшилась высота микрорельефа заготовки. Появление отрицательных элементов говорит об отсутствии контакта абразивного зерна и поверхности заготовки:

$$v_{ij}^k = \begin{cases} 0 & h_{ij} < h_{ij}^k; \\ h_{ij} - h_{ij}^k & h_{ij} > h_{ij}^k. \end{cases} \quad i \in (0; p); \quad j \in (0; q). \quad (4)$$

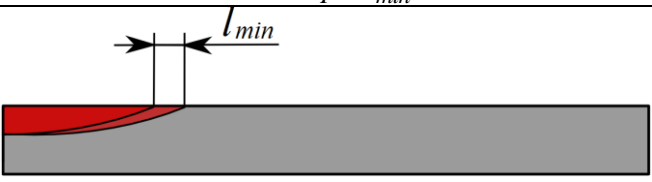
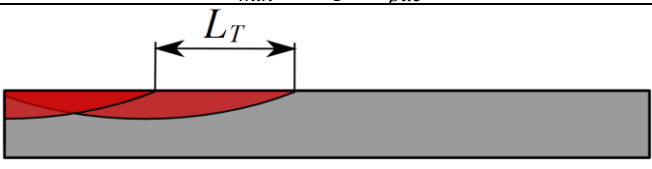
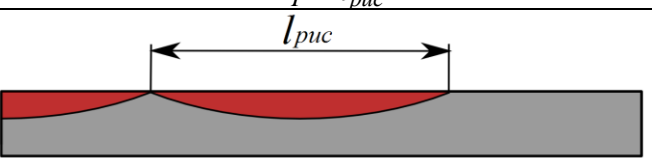
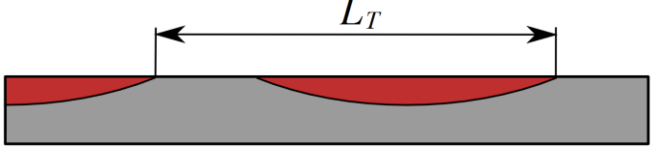
Продольное наложение рисок. Поскольку скорость вращения круга в десятки раз выше, чем скорость движения стола, то за один рабочий ход стола инструмент успевает сделать несколько оборотов, в результате чего возникает периодичность продольного наложения рисок. Вводится параметр – периодичность расположения рисок L_T – это величина поступательного перемещения стола с деталью за время одного оборота круга:

$$L_T = \frac{\pi \cdot D \cdot V_3}{60 \cdot V_K}. \quad (5)$$

Для различного сочетания скоростей периодичность расположения рисок существенно различается, определяя схему снятия всего припуска. Выделено четыре варианта периодичности расположения рисок от единичного зерна (табл. 1).

Таблица 1

Возможные варианты периодичности наложения рисок

Схема продольного наложения рисок	Пояснение
$0 < L_T < l_{min}$ 	Деталь за оборот круга передвигается на такое незначительное расстояние, что зерно попадает в прежнюю риску. В таком случае зерно не режет материал детали, а трется площадкой затупления о деталь, вызывая упругие деформации
$l_{min} < L_T < l_{pus}$ 	Деталь за один оборот круга передвигается на расстояние, меньше длины риски, но достаточное для начала микрорезания. Зерно на каждом обороте инструмента срезает стружку, как при фрезеровании
$L_T = l_{pus}$ 	Деталь за один оборот круга передвигается на расстояние, равное длине риски. Риски выстраиваются друг за другом, перекрытия рисок и необработанный материал отсутствуют
$L_T > l_{pus}$ 	За оборот круга деталь передвигается на расстояние, больше длины риски. В таком случае отсутствует перекрытие рисок и остаются участки необработанного материала

Модель шлифовального круга. Для расчетного построения поверхности заготовки от действия всего инструмента необходима модель трехмерного абразивного инструмента. На основе результатов работ, посвященных моделированию рабочей по-

верхности абразивного инструмента, принято условие случайного нормального распределения размеров абразивных зерен b_i и их равномерного распределения в поверхностном объеме инструмента диаметра D , высоте B и толщине H . Количество зерен, располагающееся в объеме поверхностного слоя всего круга, есть частное от деления объема, занимаемого всеми зернами, на объем среднего единичного зерна:

$$Z = \frac{6 \cdot W_3 \cdot \pi \cdot D \cdot B \cdot H}{\pi \cdot b_{cp}^3}, \quad (6)$$

где W_3 – структура инструмента, b_{cp} – размер основной фракции (зернистость).

Расчет микрорельефа шлифуемой поверхности. В первую очередь, определяется суммарное максимально возможное количество рисок $K = Z \times j$, где j – количество оборотов круга за один рабочий ход стола. Для каждой риски, привязанной центром к поверхности заготовки координатами x_{0k} и y_{0k} , определяется область сетки, в пределах которой действует зерно и для каждого узла из отмеченной области по зависимости (1) производится расчет высоты точки рисок. Затем каждая образованная поверхность риски вычитается из поверхности заготовки по зависимости (2) и рассчитывается срезанный слой металла.

В итоге рельеф поверхности детали формируется в результате наложения K рисок друг на друга по методу суперпозиции, т. е. каждый элемент матрицы детали есть минимальная высота расположения поверхности в данном узле из всей совокупности рисок:

$$h_{ij} = \min(h_{ij}^k); \quad k \in (1, K); \quad i \in (0; p); \quad j \in (0; q). \quad (7)$$

Организация расчета микрорельефа на каждой стадии обработки предусматривает выполнение трех пунктов:

1. Перенесение микрорельефа поверхности между рабочими ходами алгоритмически осуществляется копированием массива, содержащего матрицу высот детали. При этом одна из копий записывается в память компьютера, а вторая является исходной поверхностью при расчетах по зависимостям (3, 4, 7), изменяющейся в процессе обработки;

2. Случайную ориентацию шлифовального круга относительно его оси в момент входа круга в заготовку и начала микрорезания. Математически это учитывается прибавлением к координате центра каждой риски по x случайной величины, принимающей значения от 0 до $2\pi D$ и постоянной для каждого рабочего хода;

3. Учет обратного хода стола с заготовкой. Для этого определяется разница между величинами упругих отжатий на прямом и обратном ходах, которая влияет на высоту положения инструмента и величину снимаемого слоя.

Выполнение представленных пунктов алгоритма имитационной геометрической модели позволяют построить микрорельеф шлифованной поверхности на каждом рабочем ходе операции плоского шлифования (рис. 3).

Шероховатость шлифованной поверхности. Расчет параметров шероховатости осуществляется путем выбора на поверхности детали N поперечных сечений (рис. 4а), математически представленных столбцами матрицы $H(p \times q)$. В каждом столбце на базовой длине рассчитывается наиболее распространенный параметр шероховатости, применяемый в технологии обработки металлов резанием, среднеарифметическое отклонение профиля, определяемое следующим образом:

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (h_{i,j}^k - h_i); \quad j \in l. \quad (8)$$

Адекватность разработанной модели. Проверка адекватности разработанной модели проводилась в двух направлениях. Сопоставление длины и ширины риски при различной глубине внедрения абразивного зерна, полученных при измерении на микроскопе размеров рисок от резания единичным зерном (рис. 5а), закрепленным в специально разработанной конструкции круга и в результате компьютерного моделирования (рис. 5б). А также сопоставление параметров шероховатости поверхностей, обработанной плоским шлифованием периферией круга (рис. 4а) и полученной в результате моделирования (рис. 4б). Показано, что при 95%-ом уровне доверительной вероятности модель адекватна.

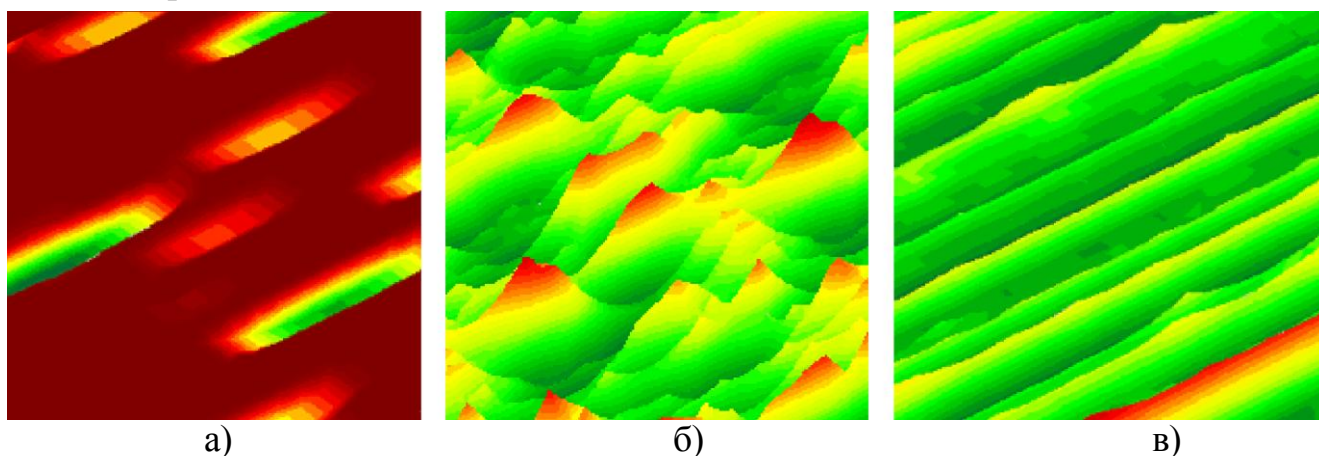


Рис. 3. Микрорельеф шлифованной поверхности на рабочем ходе:
а) касания круга и заготовки; б) активного резания; в) выхаживания

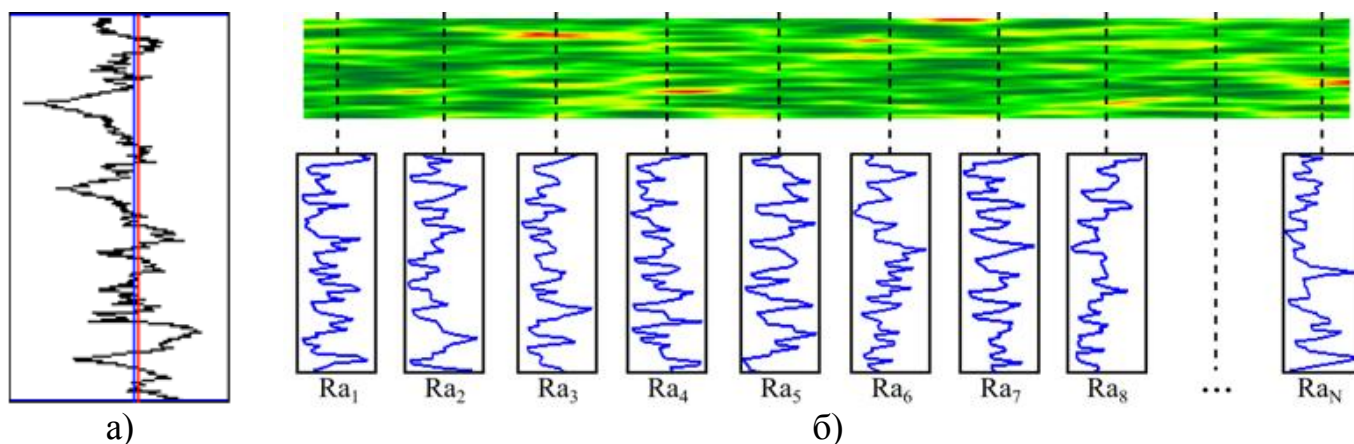


Рис. 4. Неровности, полученные в результате: эксперимента (а) и моделирования (б)

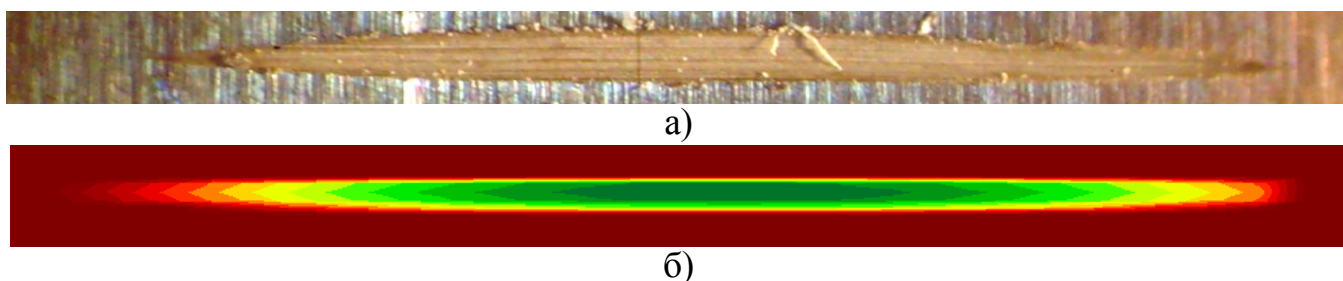


Рис. 5. Рельеф единичной шлифовальной риски, полученной в результате:
эксперимента (а) и моделирования (б)

Формирование комплексной имитационной модели

Сформированная имитационная геометрическая модель позволяет получить для каждого абразивного зерна комплекс параметров, характеризующих его механиче-

ское взаимодействие с обрабатываемой поверхностью на каждом обороте круга и каждом рабочем ходе стола с заготовкой. Поскольку имеются все параметры, описывающие механическое взаимодействие совокупности абразивных зерен – шлифовального круга, то имеется возможность каждое взаимодействие единичного зерна с обрабатываемой заготовкой представить тепловым источником и точкой приложения элементарной силы резания.

Для каждого абразивного зерна определяется количество микроконтактов с шероховатой поверхностью детали. Для этого в матрице толщин срезанного слоя V^k программно определяется количество обособленных друг от друга участков. Затем каждый такой участок представляется тепловым источником, для которого определяется набор параметров: глубина резания, размер, координаты и время действия, характер взаимодействия и интенсивность тепловыделения. Аналогичным образом каждый микроконтакт представляется точкой приложения силы. Таким образом, имеется возможность совместить имитационную геометрическую модель с теплофизической и силовой, сформировав тем самым комплексную имитационную модель.

С другой стороны, разработка теплофизической и силовой моделей является большой задачей, требующей отдельного решения. Поэтому в качестве частных моделей, описывающих теплофизику и силы резания в зоне шлифования, принимаются уже существующие модели. Анализ научной литературы показал, что одной из наиболее прогрессивных теплофизических моделей является стохастическая модель А.А. Дьяконова, построенная по дискретной схеме контакта инструмента и заготовки, а среди силовых моделей – зависимость, предложенная С.Н. Корчаком.

Разработанная геометрическая, и принятые теплофизическая и силовая модели, составляют основу для формирования комплексной имитационной модели процессов плоского шлифования периферией круга. На рис. 6 представлена структура комплексной имитационной модели (блоки и взаимосвязи, выделенные красным цветом, разработаны впервые). В подготовительной части работы программы генерируется требуемое количество абразивных зерен, представленных параболоидами вращения и поверхностный слой инструмента заполняется ими по закону равномерного распределения. По исходным данным – сгенерированному абразивному инструменту и технологическим параметрам процесса производятся расчеты в геометрической модели съема припуска и формирования шлифованной поверхности. В результате этого формируются выходные данные: микрорельеф поверхности заготовки на каждом рабочем ходе, параметры шероховатости и данные о механических микровзаимодействиях абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью. Представленные данные являются входными для расчета температур и сил резания в моделях А.А. Дьяконова и С.Н. Корчака. При этом учитываются основные особенности процесса абразивной обработки: вероятностный характер взаимодействия, нелинейность теплофизических связей, переменная интенсивность сопротивления материалов деформациям, зависящая от скорости вращения инструмента и от температуры в зоне резания. Результатами отработки программных модулей, являющихся реализациями теплофизической и силовой модели, являются температурные поля в зоне резания и на поверхности заготовки в любой момент времени и радиальная составляющая силы резания. По полученным значениям температурных полей и сил резания рассчитываются технологические параметры: глубина прижога и упругие отжатия шлифовальной бабки. Объединение теплофизической и силовой моделей с имитационной геометрической моделью позволило ликвидировать необходимость задания в этих моделях сложных для определения исходных данных и повысить точность прогнозирования выходных параметров обработки.

В результате реализации представленного комплекса на языке программирования C++ стало возможным моделировать любую стадию обработки плоским шлифованием с прогнозированием микрорельефа обработанной поверхности, температурных полей и сил резания.

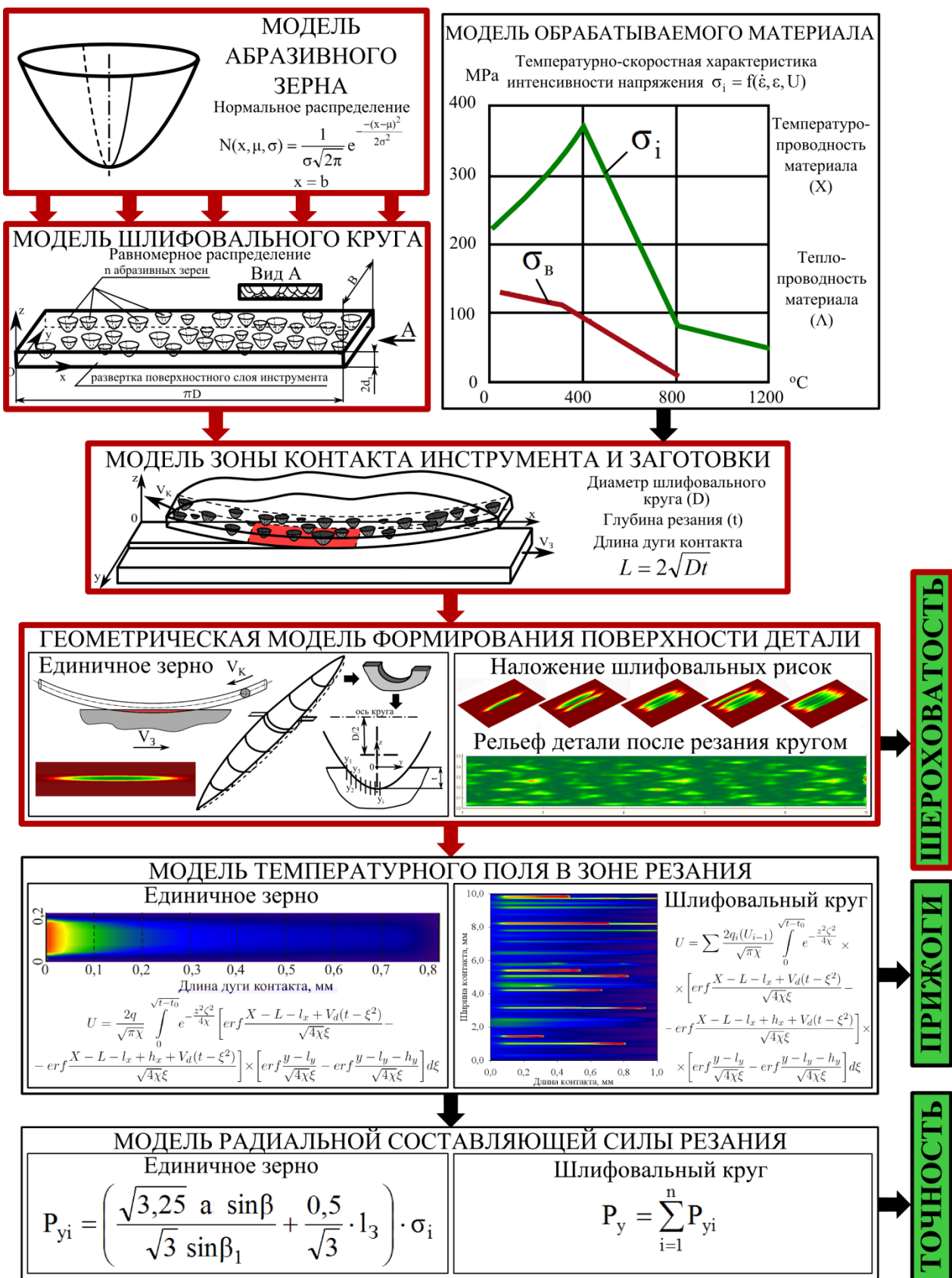


Рис. 6. Структура комплексной имитационной модели

В качестве иллюстрации работы комплексной имитационной модели предлагается рассмотреть ситуацию касания кругом поверхности заготовки, при которой на необработанной холодной поверхности при резании возникают риски и тепловые импульсы (рис. 7).

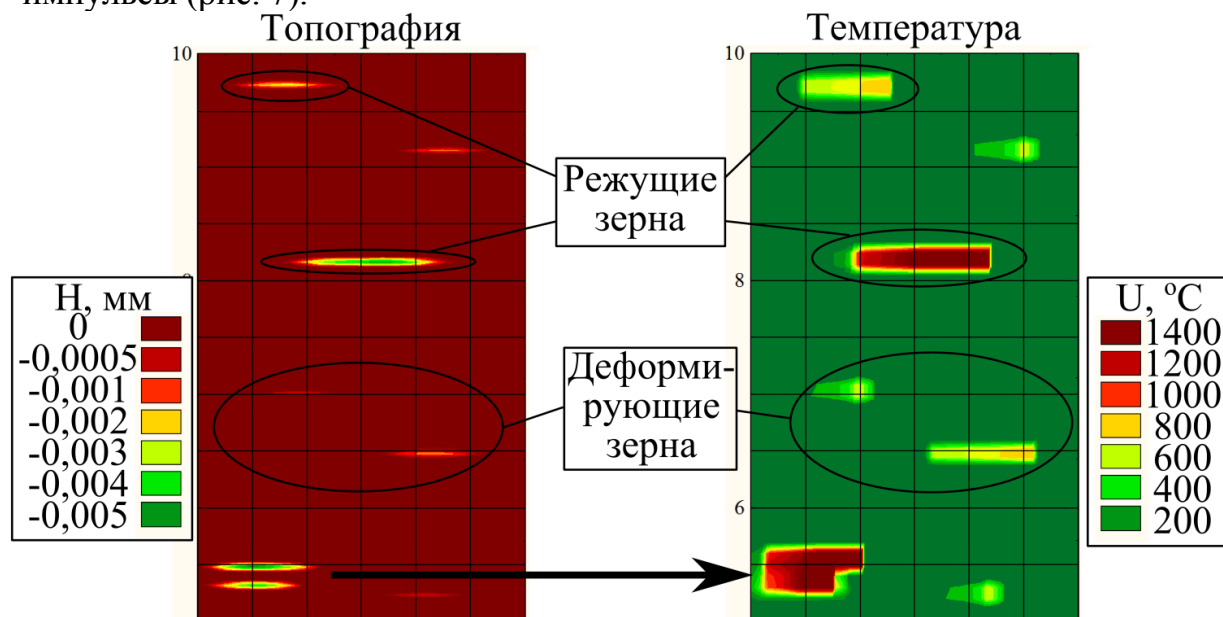


Рис. 7. Результаты расчета, иллюстрирующие сопряжение моделей

На основе комплексного имитационного моделирования процесса плоского шлифования установлено, что количество взаимодействующих абразивных зерен составляет в среднем 30% от общего числа зерен в объеме рабочей поверхности круга, что на 15–20% больше известных данных, а интенсивность тепловыделения и сила резания от единичного абразивного зерна за счет учета топографии обрабатываемой поверхности меньше на 14–21%.

Методика проектирования операций плоского шлифования на основе оптимизации количества рабочих ходов на стадиях обработки

Разработанная и реализованная комплексная имитационная модель составляет базу для совершенствования методики проектирования операций плоского шлифования периферией круга. Совершенствование методики основывается на делении припуска на стадии, наложении на каждую из них активных технологических ограничений и исходя из этого назначении режимов резания. В связи с этим необходимо сформировать комплекс основных технологических ограничений по: осыпаемости инструмента, глубине прижога, мощности, точности и шероховатости. А затем из представленного комплекса расчетным образом определить активные технологические ограничения на каждую из стадий обработки.

На первой стадии снимается большая часть припуска за исключением оставленного на снятие дефектов слоя. Активными технологическими ограничениями на этой стадии являются прикладываемое к зерну и к связке сила резания, температура, вызывающая прижог не более оставшегося припуска и мощность станка:

$$\begin{cases} F_C = f_C(V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, \eta, \gamma_C, E_C, d_3, W_3) \leq P_{Y_i}; \\ F_3 = f_3(V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, \eta, \gamma_3, E_3, d_3, W_3) \leq P_{Y_i}; \\ h_{np} = f_{II}(D, B, l, U, V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, \lambda, \chi) \leq \Pi_{ост}; \\ N_{uw} = f_N(D, B, V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}) \leq N_{y\partial}. \end{cases} \quad (10)$$

Целью второй стадии обработки является снятие дефектного слоя, образовавшегося на черновой стадии, и выполнение размерной точности обработки за счет уменьшения сил резания и упругих отжатий. Технологическими ограничениями на этой стадии являются отсутствие прижога на поверхности и выполнение размерной точности обработки.

$$\begin{cases} h_{np} = f_{II}(D, B, l, U, V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, \lambda, \chi) = 0; \\ \delta = f_{\delta}(D, B, l, \sigma_i(\dot{\varepsilon}, \varepsilon, U), V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, P_Y, j) \leq IT. \end{cases} \quad (11)$$

Третья стадия обработки направлена на формирование заданной шероховатости. Прижоги на данной стадии исключены, а упругие деформации сняты на предыдущей стадии, поэтому рассматривается лишь технологическое ограничение по шероховатости:

$$Ra = f_{Ra}(D, B, l, V_K, V_3, S_{ДВ.Х.}, t, d_3, W_3) \leq Ra_{треб}. \quad (12)$$

Полученные системы уравнений (10)–(12) есть математическая постановка задачи оптимизации количества рабочих ходов на стадиях обработки. Эта задача относится к задачам математического программирования. В соответствии с формальным аппаратом математического программирования по каждому ограничивающему параметру, представленному уравнением из (10)–(12), определяется область допустимых параметров управления – скорости движения стола V_3 и радиальной подачи на двойной рабочий ход $S_{рад}$. Пересечение областей определяет область бездефектных режимов резания, которые гарантируют выполнение всех требований на соответствующей им стадии обработки. Область не вырождается в точку, поэтому вводится критерий оптимальности. Для каждой из трех стадий условие оптимальности – это минимум основного времени t_o . Для плоского шлифования периферией инструмента основное время зависит от количества рабочих ходов и скорости движения стола с заготовкой, поэтому градиент основного времени имеет ступенчатый вид (рис. 8.а). Наложение области допустимых режимов резания на построенный градиент формирует несколько подобластей для различного количества рабочих ходов (рис. 8.б). В каждой подобласти находится оптимальная точка, в результате чего имеем несколько конкурирующих точек, из которых оптимальной является ситуация с минимальным основным временем.

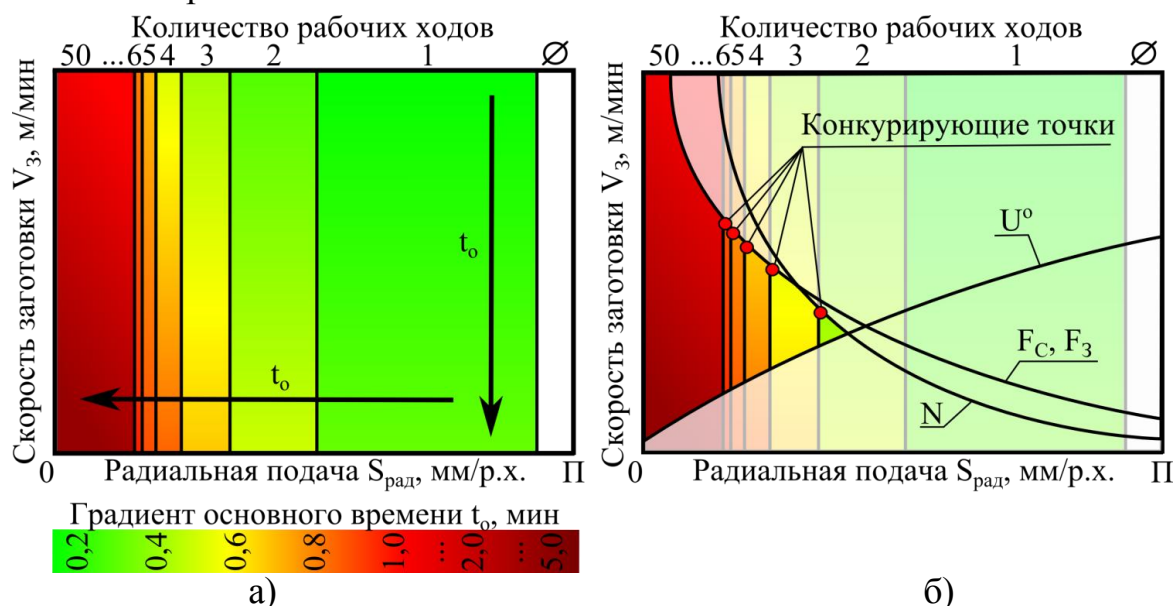


Рис. 8. Области допустимых режимов резания для черновой стадий обработки

Для реализации общей схемы поиска бездефектных режимов резания предлагается расчетный алгоритм, позволяющий построить области допустимых режимов резания и найти оптимальные по минимуму основного времени параметры обработки. Алгоритм внедрен в модуль ADEM NTR системы ADEM CAD\CAM\CAPP.

В инженерной методике рекомендации по бездефектным режимам оформлены в виде традиционных для технологических справочников таблиц решения. В рамках инженерной методики для каждой группы обрабатываемости разработаны рекомендации по выбору подачи на двойной рабочий ход на черновой (табл. 2) и чистовой стадиях (табл. 3), а также рекомендации по количеству выхаживающих рабочих ходов, требуемых для достижения заданной шероховатости (табл. 4). Разработанные рекомендации оформлены в виде руководящих технических материалов, которые внедрены на предприятии ЗАО «ЧелябНИИконтроль».

Таблица 2

Рекомендации по выбору радиальной подачи на черновой стадии обработки

Скор. стола V_3 , м/мин	Скор. круга V_K , м/с	Тверд. круга	Зернистость круга	Осевая подача S_{OC} , мм/р.х., до			
				8	12	18	27
				$S_{рад}$ ограниченная осыпаемостью круга, мм/р.х.			
12,5	35	К	< F60	0,18	0,11	0,075	0,05
			> F60	0,26	0,14	0,115	0,07
		N	< F60	0,20	0,13	0,090	0,06
			> F60	0,29	0,18	0,130	0,08
		P	< F60	0,22	0,15	0,105	0,07
			> F60	0,32	0,23	0,160	0,10
Скор. стола V_3 , м/мин	Скор. круга V_K , м/с	Диам. круга, мм	Припуск на чистовую стадию, мм	Осевая подача S_{OC} , мм/р.х., до			
				8	12	18	27
				$S_{рад}$ ограниченная глубиной прижога, мм/р.х.			
12,5	35	< 250	0,01	0,11	0,090	0,080	0,073
			0,02	0,19	0,160	0,140	0,125
			0,03	0,27	0,230	0,200	0,170
		> 250	0,01	0,10	0,088	0,075	0,068

Таблица 3

Рекомендации по выбору радиальной подачи на чистовой стадии обработки

Скор. стола V_3 , м/мин	Скор. круга V_K , м/с	Квалитет готовой детали	$S_{рад}$ на черновой стадии, мм/р.х.	Осевая подача S_{OC} , мм/р.х., до			
				8	12	18	27
				$S_{рад}$ ограниченная точностью обработки, мм/р.х.			
12,5	35	5	> 0,1	0,036	0,022	0,015	0,010
			> 0,2	0,052	0,028	0,023	0,014
		6	> 0,1	0,04	0,026	0,018	0,012
			> 0,2	0,058	0,036	0,026	0,016
Скор. стола V_3 , м/мин	Скор. круга V_K , м/с	Диам. круга, мм	Припуск на чист. стадию, мм	Осевая подача S_{OC} , мм/р.х., до			
				8	12	18	27
				$S_{рад}$ ограниченная отсутствием прижога, мм/р.х.			
20	35	< 250	0,1	0,022	0,018	0,016	0,015
			0,2	0,038	0,032	0,026	0,025
			0,3	0,054	0,046	0,040	0,034

Назначение количества рабочих ходов на выхаживающую стадию

Зерни- стость	Требуемая шероховатость детали, мкм								
	2,5	1,25	0,63	0,32	0,16	0,08	0,04	0,02	0,01
	Количество выхаживающих рабочих ходов i								
F120	1	1	1	1	1	1	1	2	7
F100	1	1	1	1	1	1	2	5	10
F46	1	1	1	1	5	–	–	–	–
F20	1	1	1	7	–	–	–	–	–

Сопоставление технологий плоского шлифования периферией круга спроектированной по нормативным справочникам и на основе рассчитанных по представленной методике режимов обработки показало, что работа на предельно обоснованных режимах резания повышает производительность на 80–120%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Результаты:

1. В представленной научно-квалификационной работе изложены научно обоснованные технологические решения, направленные на повышение производительности плоского шлифования периферией круга на основе оптимизации рабочих ходов и стадий обработки, и имеющие существенное значение для развития технологии абразивной обработки и машиностроения в целом.

2. Разработана имитационная геометрическая модель формирования шлифованной поверхности заготовки и съема припуска в результате взаимодействия с трехмерным поверхностным слоем инструмента, имеющего вероятностную структуру. Реализация геометрической модели позволила прогнозировать микрорельеф поверхности и параметры ее шероховатости на каждом рабочем ходе и стадии обработки.

3. Сформированы математические зависимости и алгоритм обработки выходных данных из имитационной геометрической модели, позволяющие получить базу для расчета температур и сил резания.

4. Сформирована комплексная имитационная модель процесса плоского шлифования периферией инструмента, включающая в себя: разработанную имитационную геометрическую модель формирования шлифованной поверхности и съема припуска, алгоритм сопряжения частных моделей, теплофизическую модель А.А. Дьяконова и силовую модель С.Н. Корчака.

5. Установлено, что при проектировании операций плоского шлифования в виде трехстадийного цикла обработки активными технологическими ограничениями являются:

– на черновой стадии – прикладываемая к зерну и к связке сила, температура, при которой глубина прижога не превышает оставшуюся часть припуска и мощность привода станка;

– на чистовой – стадии предельная температура для бесприжоговой обработки и выполнение размерной точности;

– на выхаживающей стадии – достижение заданной шероховатости поверхности готовой детали.

6. На основе схемы деления припуска разработана методика оптимизации количества рабочих ходов на стадиях обработки плоским шлифованием периферией круга, обеспечивающая назначение более производительных режимов резания с выполнением всех учитываемых технологических ограничений и включающая в себя:

– расчетный алгоритм для автоматического деления припуска на части и построения областей допустимых режимов резания на каждую стадию с учетом накладываемых технологических ограничений и выбор их значений, обеспечивающих минимум основного времени;

– инженерная методика назначения режимов резания на операции плоского шлифования периферией круга, оформленная в виде РТМ для предприятий.

Выводы:

1. Разработанная имитационная геометрическая модель формирования шлифованной поверхности и съема припуска отличается от существующих возможностью расчета микропрофиля поверхности детали в процессе ее обработки, что позволило прогнозировать параметры шероховатости после каждого рабочего хода в зависимости от режимов резания и характеристик шлифовального круга.

2. На основе комплексного имитационного моделирования процесса плоского шлифования установлено, что количество взаимодействующих абразивных зерен составляет в среднем 30% от общего числа зерен в объеме рабочей поверхности круга, что на 15–20% больше известных данных, а интенсивность тепловыделения и сила резания от единичного абразивного зерна за счет учета топографии обрабатываемой поверхности меньше на 14–21%.

3. Комплексное имитационное моделирование позволяет осуществлять компьютерную отладку операций плоского шлифования периферией круга, тем самым уменьшить время технологической подготовки производства и время станочной отладки, а в ряде случаев полностью исключить этот этап.

4. Разработана методика проектирования операций плоского шлифования периферией круга, заключающаяся в делении всего припуска на стадии обработки и назначении на каждую из них предельных режимов резания в зависимости от накладываемых дифференцированных технологических ограничений. Апробация данной методики проведена путем разработки технологии обработки экспериментального образца и детали – синусной линейки с предприятия «ЧелябНИИКонтроль». Получен прирост в производительности обработки экспериментального образца – на 120%, и синусной линейки – на 80%.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Шипулин, Л.В. Совершенствование методики проектирования операций плоского шлифования периферией круга на основе комплексного моделирования процесса / Л.В. Шипулин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/108-9014> (дата обращения: 29.04.2013).

2. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №6 (24). – С. 14–18.

3. Кошин, А.А. Стохастические модели температурных и силовых явлений, происходящих при шлифовании, и их реализация средствами параллельных вычислений / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2012. – Выпуск 12 – №18(277). – С. 20–31.

4. Гузеев, В.И. Модель стохастического съема припуска и формирования поверхности при плоском шлифовании периферией круга для автоматизированного управления процессом / В.И. Гузеев, А.А. Кошин, Л.В. Шипулин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Выпуск 16. – №23(282). – С. 127–134.

5. Дьяконов, А.А. Область применения теории быстродвижущихся источников в задачах теплофизики абразивной обработки при дискретной схеме контакта / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // *Фундаментальный и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – №4/2. – С. 136–142.

Свидетельства

6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2012614009 Российская Федерация. Имитационная стохастическая модель формирования обработанной поверхности при плоском шлифовании периферией круга / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин. – № 2012611638; заявл. 07.03.2012; зарегистр. 28.04.2012.

Другие публикации

7. Shipulin, L.V. Complex Model of Surface Grinding / L.V. Shipulin // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012, IMECS 2012, 14-16 March, 2012, Hong Kong*. – P. 1325–1327.

8. Шипулин, Л.В. Комплексная модель процессов шлифования как модуль САЕ-системы / Л.В. Шипулин, А.А. Кошин // *Седьмая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности» (ITI*2012): тезисы докладов (30-31 октября 2012 года, Минск)*. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – С. 187–188. – ISBN 978-985-6744-78-8.

9. Кошин, А.А. Применение комплексной имитационной стохастической модели процессов шлифования при решении ряда задач / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин // *Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. (Москва, 21 – 23 сентября 2012 г.)*. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 34–35.

10. Кошин, А.А. Математическое описание микропрофиля царапины, образованной в результате резания единичным абразивным зерном / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин // *Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр.* – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 72–77.

11. Шипулин, Л.В. Функциональная схема комплексной модели процессов абразивной обработки / Л.В. Шипулин // *Научный поиск: материалы четвертой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки*. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Т. 2. – С. 86–90.

12. Шипулин, Л.В. Комплексная имитационная стохастическая модель процессов абразивной обработки / Л.В. Шипулин // *Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. (Москва, 28 сентября – 01 октября 2011 г.) / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 332.

13. Шипулин, Л.В. Стохастическая теплофизическая модель процессов шлифования как составляющая комплексной модели / Л.В. Шипулин // *«Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства»: труды III Международной научно-технической конференции (Резниковские чтения) (Тольятти, 12–14 октября 2011 года) / под ред. Л.А. Резникова*. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. – С. 80–85.

14. Кошин, А.А. Двумерная алгоритмическая модель геометрии микрорезания при плоском шлифовании периферией круга / А.А. Кошин, Л.В. Шипулин // *Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр.* – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 76–81.

Шипулин Леонид Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПЛОСКОГО
ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА НА ОСНОВЕ
КОМПЛЕКСНОГО ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА

Специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать XX.XX.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 88/214.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

