

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ШЛИФОВАНИИ, И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.А. Кошин, Л.В. Шипулин

Рассмотрены стохастические модели температурного поля в зоне резания и радиальной составляющей силы резания при шлифовании. Стохастичность взаимодействия инструмента и заготовки вызвана вероятностным строением шлифовального круга, что обусловлено технологией его производства. Рассмотрены вспомогательные модели, необходимые для правильного функционирования основных моделей. Построена информационная схема программного комплекса, включающая основные модули и связи между ними. Показаны масштабы проводимых расчетов и необходимость применения параллельных технологий. Структурно программа разбита на три блока, каждый из данных блоков представляет собой набор вложенных циклов (глубина вложенности от 2 до 4). При этом циклы, начиная с глубины 2, допускают эквивалентное преобразование к виду, содержащему независимые итерации. Цикл верхнего уровня допускает распараллеливание с условием синхронизации входных данных в начале каждой итерации. В параллельной реализации программного комплекса использована комбинация технологий MPI и OpenMP.

Ключевые слова: шлифование, моделирование, параллельные вычисления.

Введение

В современном машиностроении существует ряд проблем, возникших в результате интенсивного научно-технического прорыва. В первую очередь, это проблемы отсутствия режимно-инструментальных рекомендаций для операций шлифования, выполняемых на новейшем высокоскоростном оборудовании при обработке новых сложноструктурных материалов.

Выходом из сложившейся ситуации может быть традиционное обобщение и обработка экспериментальных данных и опыта производства, но для такого подхода необходимо наработать достаточное количество экспериментальных данных, что затруднительно по нескольким причинам. К ним можно отнести: номенклатура новых материалов постоянно увеличивается, некоторые материалы разрабатываются в единственном экземпляре для конкретного решения, а некоторые имеют очень высокую стоимость.

Поэтому предлагается альтернативное решение — глубокое имитационное моделирование процесса абразивной обработки, в результате которого по заранее известным свойствам обрабатываемого материала можно определить его реакцию на силовое и температурное воздействие в процессе обработки, оценить обрабатываемость.

Шлифование это процесс множественного скоростного микрорезания, в процессе которого обработанная поверхность формируется наложением микроследов от резания абразивными зернами друг на друга [1]. Важнейшими особенностями шлифования, отличающими его от лезвийных процессов резания, являются: быстропротекаемость (время единичного воздействия абразивного зерна на заготовку составляет порядка 10^{-5} – 10^{-8}), наличие внутренней существенной нелинейной зависимости прочностных свойств обрабатываемого материала от температурно-скоростных прочностных характеристик процесса и стохастический характер взаимодействия режущего профиля абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

1. Стохастическая модель температурного поля в зоне резания

Глубокое имитационное моделирование базируется на теплофизической модели процесса абразивной обработки.

Расчетная схема теплофизической модели представлена на рис. 1.

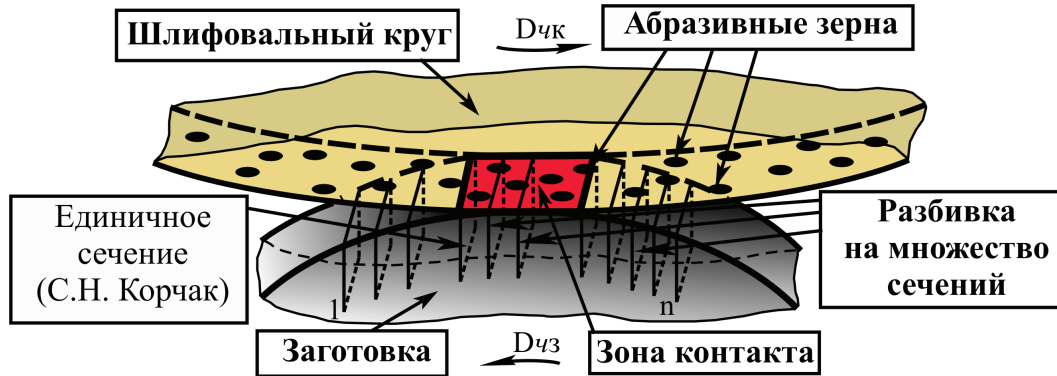


Рис. 1. Расчетная схема теплофизической модели процессов шлифования

Математическое описание трехмерного температурного поля в зоне шлифования при полном учете кинематики процесса — скорости круга, заготовки, скоростей подачи, а также представлении процесса абразивной обработки, как процесса множественного микрорезания абразивными зернами приводит ко второй краевой задаче для уравнения теплопроводности в среде, движущейся со скоростью заготовки V_3 , и стохастическим множеством тепловых источников, пробегающих зону контакта круга с заготовкой со скоростью круга V_K . В результате математических преобразований, замен и подстановок получим функции влияния отдельного теплового источника:

$$U = \frac{2q}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[\operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi}\xi} - \operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+h_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi}\xi} \right] \times \left[\operatorname{erf} \frac{y-l_y}{\sqrt{4\chi}\xi} - \operatorname{erf} \frac{y-l_y-h_y}{\sqrt{4\chi}\xi} \right] d\xi. \quad (1)$$

При имитационном моделировании происходит расчет тепла от первого теплового источника — абразивного зерна, которое первым вошло в зону пятна контакта, по зависимости (1) с учетом температурно-скоростных прочностных свойств материала [2]:

$$q = f(\sigma_i), \quad (2)$$

где σ_i — интенсивность сопротивления материала деформации:

$$\sigma_i = f(\dot{\varepsilon}, \varepsilon, U), \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации; ε — степень деформации; U — температура.

Затем производятся расчет тепла от второго теплового источника — абразивного зерна. Оно работает в среде уже нагретого металла, поэтому интенсивность тепловыделения рассматриваемого источника является функционально связанной с температурой от действия предыдущего — наличие внутренней нелинейности процесса:

$$q_i = f(U_{i-1}). \quad (4)$$

Таким образом, функцию влияния отдельного теплового источника можно представить в виде рекурсии для описания температурного поля для любого количества источников:

$$\begin{cases} U_0 = 0; \\ U_i = \frac{2q(U_{i-1})}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[\operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} - \right. \\ \left. - \operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+h_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \times \left[\operatorname{erf} \frac{y-l_y}{\sqrt{4\chi\xi}} - \operatorname{erf} \frac{y-l_y-h_y}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi. \end{cases} \quad (5)$$

Суммирование (1) по всем источникам позволяет сформировать многокритериальную трехмерную теплофизическую модель процессов абразивной обработки:

$$U = \sum \frac{2q_i(U_{i-1})}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[\operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} - \right. \\ \left. - \operatorname{erf} \frac{X-L-l_x+h_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \times \left[\operatorname{erf} \frac{y-l_y}{\sqrt{4\chi\xi}} - \operatorname{erf} \frac{y-l_y-h_y}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi. \quad (6)$$

2. Модель радиальной составляющей силы резания

Представленная теплофизическая модель процесса шлифования создает основу для расчетного определения силы резания при шлифовании. Расчетная схема модели радиальной составляющей силы резания приведена на рис. 2. Теплофизическая модель позволяет определить количество абразивных зерен в зоне шлифования в каждый момент времени. При этом для каждого зерна, рассчитав температуру срезаемого им слоя, можно определить эффективную прочность срезаемого металла — σ_i .

Для определения радиальной составляющей силы резания от единичного абразивного зерна воспользуемся аналитической зависимостью (7) С.Н. Корчака [2]:

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{3,25}a \sin \beta}{\sqrt{3} \sin \beta_1} + \frac{0,5}{\sqrt{3}} l_3 \right) \sigma_i, \quad (7)$$

где σ_i — интенсивность сопротивления материала деформации, которая зависит от температуры срезаемого слоя материала.

Поскольку количество зерен, участвующих в контакте в каждый момент времени, известно, то несложно рассчитать величину их суммарного силового воздействия (8):

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{yi}. \quad (8)$$

Абразивные зерна расположены на развертке круга случайным образом, поэтому после нахождения радиальной составляющей силы резания в каждый момент времени производится статистическая обработка — определяется среднее значение и его дисперсия.

Определение среднего значения радиальной составляющей силы резания:

$$P_y = \frac{\sum_{i=1}^n P_y(t_i)}{n}, \quad (9)$$

где $P_y(t_i)$ — радиальная сила резания в момент времени i ; n — количество рассмотренных моментов времени.

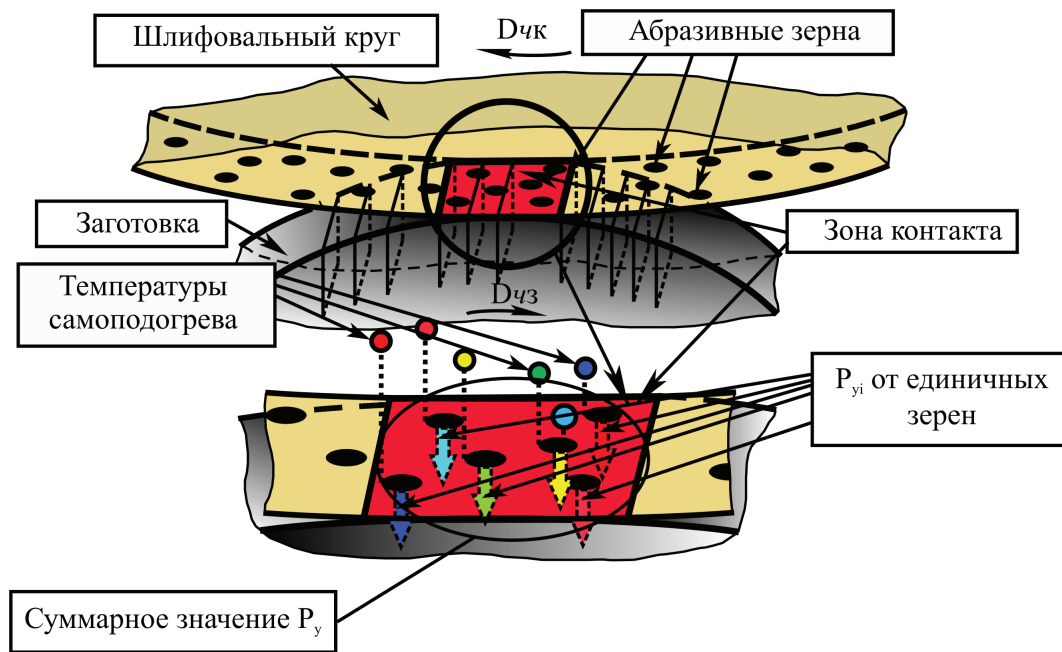


Рис. 2. Расчетная схема определения радиальной составляющей силы резания в зоне контакта при шлифовании [3]

Таким образом, совокупность зависимостей (7, 8, 9) представляет собой стохастическую силовую модель процесса шлифования.

3. Вспомогательные модели

Для обеспечения функционирования теплофизической и силовой моделей, а также для учета физических особенностей процесса шлифования вводятся вспомогательные частные модели.

1. Модель рабочей поверхности шлифовального круга. Строение рабочей поверхности шлифовального круга носит вероятностный характер, закладываемый на начальных операциях изготовления абразивного инструмента. Стохастичность заключается в двух основных моментах.

Во-первых, при просеивании абразивных зерен через сито обеспечивается 40–45 % основной фракции (номинального значения диаметра зерна), а 55–60 % зерен имеют соответствующие отклонения по ГОСТ Р52381 — 2005 «Материалы абразивные» [4]. Размеры абразивных зерен имеют нормальное распределение $N(x, \mu, \sigma)$:

$$N(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (10)$$

Во-вторых, при смешивании абразивных зерен и связки и последующем спекании добавляется вероятностный характер расположения абразивных зерен в объеме круга. Перемешивание зерен и смазки осуществляется до получения однородной массы, в которой абразивные зерна распределены равномерно. Поэтому распределение координат центров зерен на рабочей поверхности шлифовального круга осуществляется по закону равномерного распределения (11).

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a; \\ \frac{x}{b-a} & a \leq x < b; \\ 1 & x \geq b. \end{cases} \quad (11)$$

По заданным размерам диаметра и высоты шлифовального круга строится развертка, на которой распределяются абразивные зерна с размерами по зависимости (10) и координатами центров по зависимости (11).

2. Модель обрабатываемого материала. В процессах шлифования скорость деформации материала составляет 10^{-6} – 10^{-7} с [5], что на два порядка превышает скорость деформации стандартных механических испытаний, а резание происходит в нагретой среде от ранее работавших зерен. Поэтому для оценки действительного сопротивления материала пластическому деформированию необходимо знать его температурно-скоростную характеристику интенсивности напряжений, т. е. функцию:

$$\sigma_i = f(\dot{\varepsilon}, \varepsilon, U), \quad (12)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации; ε — степень деформации; $U = f(U_{i-1})$ — температура.

Зависимость (14), коэффициент теплопроводности материала (λ) и коэффициент температуропроводности материала (χ) являются математической моделью обрабатываемого материала.

3. Модель контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Контактное взаимодействие абразивного зерна и обрабатываемого материала можно описать как действие двух сил: силы от сопротивления металла сдвигу по поверхности сдвига (13) и силы трения по вершине зерна — площадке затупления (14).

$$P_{zP} = \frac{\sqrt{3, 25} a \cos \beta \sigma_i \mu}{\sqrt{3} \sin \beta_1}, \quad (13)$$

$$P_{zTP} = \frac{0, 5 a \sigma_i \mu}{\sqrt{3}}, \quad (14)$$

где β — угол действия, β_1 — угол сдвига, a — толщина срезаемого слоя, приходящаяся на единичное абразивное зерно, μ — коэффициент трения.

4. Модель интенсивности теплового источника с учетом остаточной температуры от действия предыдущих тепловых источников — абразивных зерен и температурной зависимости прочностных свойств обрабатываемого материала. Моделируемые абразивные зерна делятся на режущие, которые совершают снятие металла, и трущие, которые трутся об обрабатываемую поверхность. Различие в характере взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым материалом заключается в различной интенсивности тепловыделения в зоне пластической деформации (15) и в зоне трения (16).

$$q_s = \frac{\sqrt{3, 25} \cos \beta V_k \sigma_i (U_{i-1})}{\sqrt{3} \sin \beta_1}, \quad (15)$$

$$q_{тр} = \frac{0, 15 V_k \sigma_i (U_{i-1})}{\sqrt{3}}. \quad (16)$$

Стоит отметить, что интенсивность тепловыделения рассматриваемого источника является функционально связанной с температурой от действия предыдущего источника — наличие внутренней нелинейности процесса $q_i = f(U_{i-1})$.

4. Информационная структура и выбор средств реализации

Реализацией комплексной модели процесса шлифования, включающей в себя основные модели (температурного поля в зоне контакта и радиальной составляющей силы резания) и вспомогательные (представленные выше) является программный комплекс, состоящий из 10 модулей и информационных взаимосвязей между ними. На рис. 3 представлена структура программного комплекса.

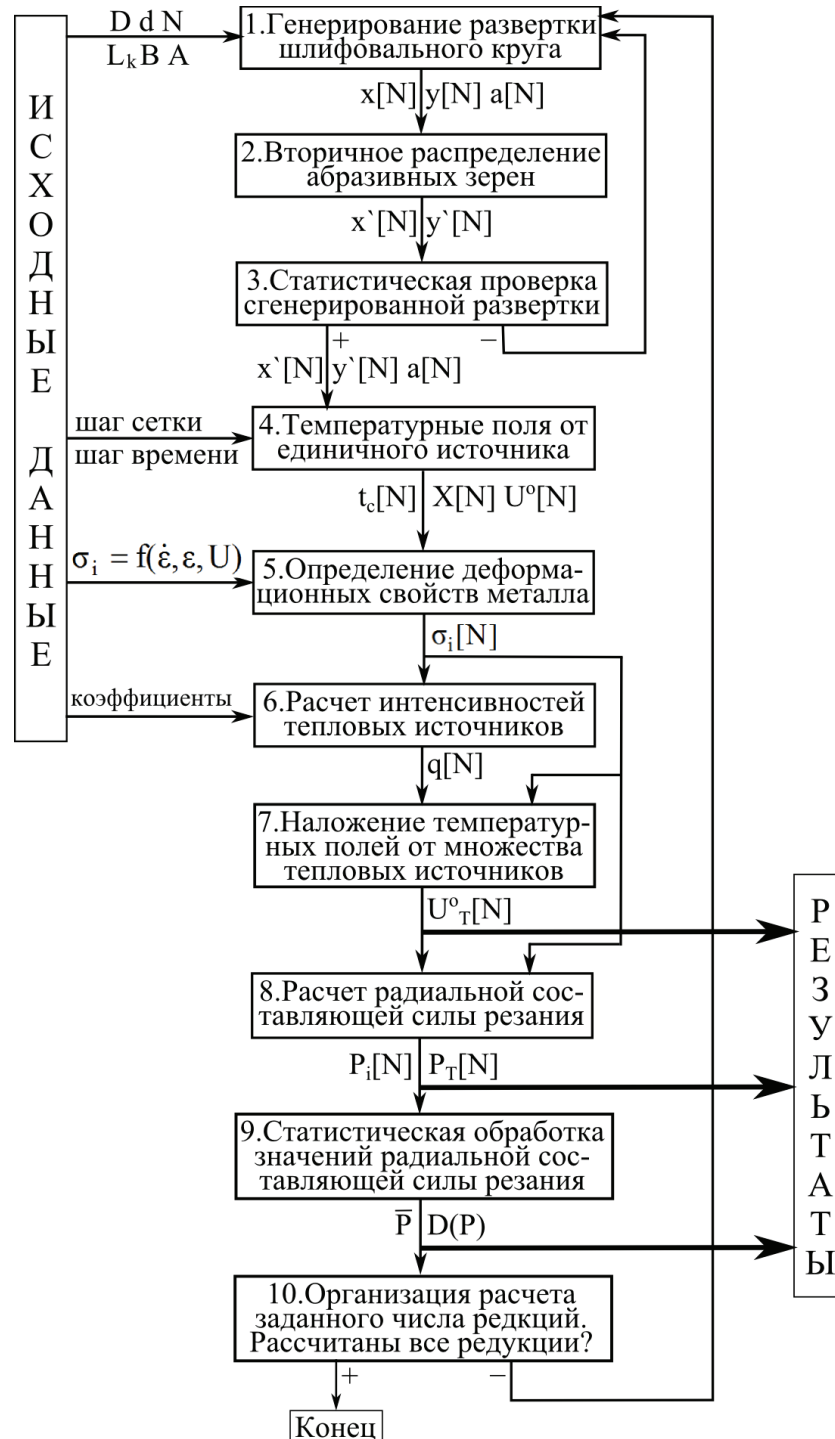


Рис. 3. Структура программного комплекса

1. Модуль генерации вероятностного строения рабочего профиля абразивного инструмента. Исходными данными являются: диаметр круга (D), диаметр детали (d), количество зерен на развертке (N), ширина шлифования (B), длина дуги контакта (L_k), размер фракции зерен (A). В модуле производится построение развертки шлифовального круга. По заданным законам распределения на развертке генерируются абразивные зерна. Для каждого зерна определяется координата расположения центра по ширине развертки $x[N]$, по длине развертки $y[N]$ и размер зерна $a[N]$.

2. Модуль вторичного распределения зерен с учетом их случайных размеров. При первичном распределении не учитываются размеры зерен, поэтому могут возникнуть наложения границ зерен друг на друга и выход границ зерна за границы развертки, что в реальности не возможно. В модуле 2 производится анализ развертки с расположенными на ней зернами и вносятся необходимые корректировки. Таким образом, результатами работы модуля будут измененные массивы координат расположения центров зерен по ширине развертки $x'[N]$ и по длине развертки $y'[N]$.

3. Модуль статистической обработки и проверки значимости распределений. Статистическая проверка распределения размеров и координат центров абразивных зерен. Если распределение размеров и координат зерен адекватно, то программный модуль продолжает выполнение алгоритма, если же не адекватно — возвращается в модуль 1.

4. Модуль расчета трехмерного температурного поля в движущемся полупространстве от воздействия движущегося теплового источника. Определение моментов времени и координат входа каждого абразивного зерна в пятно контакта и выхода из зоны резания. Для каждого участка рассчитываются температурные характеристики перед зерном, под зерном и за зерном. Результатами являются массивы моментов времени и координат входа абразивных зерен в пятно контакта и выхода из зоны резания; массивы трехмерных температурных полей от воздействия каждого движущегося теплового источника — абразивного зерна.

5. Модуль базы данных по деформационным свойствам обрабатываемого материала от скорости, степени и температуры в очаге деформирования. Температурно-скоростная прочностная характеристика материала — это зависимость, отражающая изменение прочностных свойств материала под воздействием нагрева и высоких скоростей резания. Зависимость задается массивом значений интенсивности сопротивления материала деформациям ($\sigma_i[N]$), соответствующих определенной температуре самоподогрева (U).

6. Модуль расчета интенсивности теплового источника. Первое зерно обладает рассчитанной интенсивностью теплового источника, поскольку оно совершает резание холодного металла. Каждое последующее зерно входит в нагретый металл, интенсивность сопротивления материала деформации которого изменена. Поэтому производится корректировка интенсивности тепловыделения для каждого зерна с учетом температуры перед зерном (температуры самоподогрева) и температурно-скоростной характеристики.

7. Модуль наложения температурных полей от множества тепловых источников. Пятно контакта разбивается на сетку по заданному количеству узлов по ширине, длине и глубине пятна контакта. Расчеты производятся для каждого временного слоя, количество которых зависит от заданного шага интегрирования по времени. В каждый промежуток времени для каждого узла сетки рассчитывается температура.

8. Модуль расчета радиальной составляющей силы резания. Известно, сколько зерен находится в зоне контакта в каждый промежуток времени с заданным временным шагом интегрирования. Для каждого зерна, находящегося в данный момент времени в зоне контакта рассчитывается радиальное усилие резания. Зная количество одновременно находящихся абразивных зерен в зоне контакта и усилие резания каждого зерна, рассчитывается суммарная радиальная составляющая силы резания.

9. Модуль статистической обработки значений радиальной составляющей силы резания.

Статистическая обработка значений радиальной составляющей силы резания за время полного контакта зоны шлифования с рабочим профилем шлифовального круга проводится путем нахождения среднеарифметического значения по всем моментам времени. Производится статистическая оценка разброса значений сил резания, находятся доверительные интервалы для средней силы резания.

10. Модуль организации расчета заданного числа редукций. Отработка модулей 1–9 является одной редукцией, в которой производятся расчеты всех силовых и температурных показателей для одной сгенерированной вероятностной поверхности абразивного инструмента. Т. к. полученные результаты являются случайными величинами, то необходимо проводить расчеты нескольких редукций. Модуль организации расчета заданного числа редукций осуществляется заданием цикла, включающего в себя модули 1–9. Исходными и выходными данными являются аналогичные данные из модулей 1–9.

При расчетах температурных полей в имитационной стохастической модели пятно контакта шлифовального круга с заготовкой разбивается на сетку, состоящую из 250 узлов по длине и 200 по ширине. Данная сетка рассчитывается для 5 глубин заготовки. Количество величин в каждом узле, которые необходимо знать — 3. Количество временных слоев при шаге интегрирования по времени 10^{-6} с составляет порядка 100. Одной редукцией является генерирование случайной по-верхности шлифовального круга и получение расчетных результатов — температурных полей и усилий резания. Поскольку модель является стохастической, то необходимо производить расчеты 10 редукций. Таким образом, количество определяемых параметров равно $200 \times 250 \times 5 \times 3 \times 100 \times 10 = 7,5 \times 10^8$. Расчет на высокопроизводительном 4-х ядерном персональном компьютере длился около 250 часов.

Анализ структуры программного комплекса позволил выявить следующие особенности:

- программный комплекс состоит из расчета заданного числа редукций, выполняемых одна за другой;
- одной редукцией является отработка модулей 1–9, т. е. длина программного комплекса сопоставима длине одной редукции;
- при расчетах k редукций время, затрачиваемое на отработку программного комплекса, будет равно умноженному на k времени расчета одной редукции;
- расчеты различных редукций независимы друг для друга.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение технологий параллельных вычислений в данной задаче является эффективным.

5. Распараллеливание имитационной модели

Первым уровнем распараллеливания последовательного алгоритма является разбивка редукций (макроцикл) по процессорам кластера, реализацию которой можно представить следующим образом. На основе одних исходных данных одновременно на N процессорах — производится реализация N независимых редукций, после чего в процессоре $N + 1$ производится статистическая обработка и структурирование выходных данных. Самой эффективной здесь является классическая параллельная схема, когда для каждой редукции исследуемой случайной функции выделяется отдельная вычислительная ветвь (количестве ветвей равно требуемому числу редукций) [7].

Вторым уровнем распараллеливания является распараллеливание микроциклов, вложенных в макроцикл. Процесс анализа исходного кода последовательной версии программного комплекса подразумевает:

1. Выявление наиболее ресурсоемких участков кода программы.
2. Редуцирование исходного кода.

Под редуцированием в данной работе понимается создание модели информационных зависимостей участка кода (обычно цикла) следующим образом:

- группировкой последовательно выполняемых участков кода в блоки.
- удалением операторов, не имеющих зависимостей в редуцируемом коде.

Анализ исходного кода и практика использования программного комплекса показали, что наибольшее время работы программного комплекса (до 99 %) затрачивается на выполнение следующих операций:

1. Формирование режущей части абразивного инструмента (рис. 4). Сложность данного блока заключается в вероятностной реализации равномерного распределения абразивных зерен и формирования их размеров по закону нормального распределения. После первичного построения режущей части возникает необходимость в корректировке — вторичное распределение зерен с учетом их случайных размеров, т. к. в некоторых случаях возникает наложение зерен вследствие первоначального распределения центров зерен, что противоречит технологии изготовления абразивного инструмента. Анализ показал, что выполнение данного блока занимает от 5 % до 20 % от итогового времени расчета.

2. Расчет интенсивности тепловыделения каждого абразивного зерна, находящегося в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью заготовки. Выполнение данного блока занимает от 5 % до 25 % от итогового времени расчета.

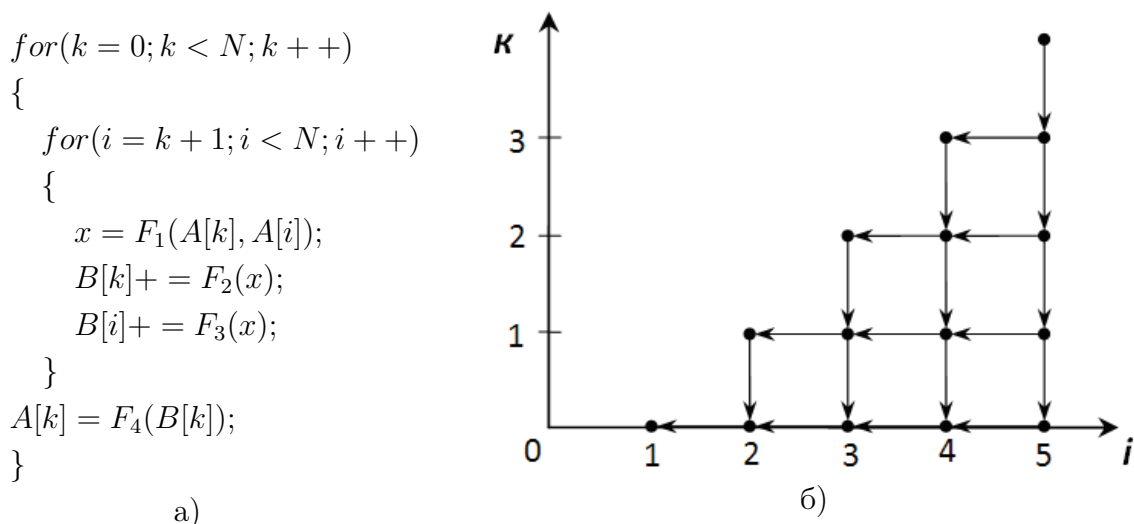


Рис. 4. Схема информационных зависимостей алгоритма формирования режущей части инструмента

3. Расчет распределения поля температур по глубине поверхностного слоя обрабатываемой поверхности в заданные моменты времени. Выполнение данного блока занимает от 60 % до 95 % от итогового времени расчета.

На первом этапе распараллеливания программного комплекса был выполнен процесс редукиции алгоритма формирования режущей части инструмента, который привел к схеме информационных зависимостей, показанной на рис. 4а. Здесь и далее $A[]$ и $B[]$ — массивы, состоящие из вещественных элементов, $F_1, \dots, F_4$ — ресурсоемкие преобразования, зависящие по данным от значения переменной x . На рис. 4б пространство итераций алгоритма представлено в соответствии с методом координат [8]. В результате анализа зависимостей пространства итераций, в соответствии с [7] было выполнено преобразование алгоритма путем замены счетчиков циклов следующим образом:

$$\begin{cases} i = \frac{N}{2} + s + j + 1 \\ k = \frac{N}{2} + s - j \end{cases}, s \in \left[-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}\right]; j \in \left[0, \dots, \frac{N}{2} - s\right]. \quad (17)$$

Схема полученного в результате преобразований алгоритма показана на рис. 5. Данный алгоритм может быть эффективно распараллелен на одном вычислительном узле при помощи директив OpenMP.

На втором этапе распараллеливания была выполнена редукция алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен. На рис. 6 показана схема информационных зависимостей данного алгоритма. Как можно заметить, итерации внешнего цикла сильно связаны между собой по данным. Однако итерация состоит из двух независимых блоков кода. Распараллеливание выполняется путем расщепления итерации внешнего цикла на две OpenMP-секции.

$$\begin{aligned}
 & \text{for}(s = \frac{N}{2}; s < \frac{N}{2}; s++) \\
 & \{ \\
 & \quad \text{for}(j = 0; j < \frac{N}{2}; j++) \\
 & \quad \{ \\
 & \quad \quad x = F_1(A[\frac{N}{2} + s - j], A[\frac{N}{2} + s + j + 1]); \\
 & \quad \quad B[\frac{N}{2} + s - j] = F_2(x); \\
 & \quad \quad B[\frac{N}{2} + s + j + 1] = F_3(x); \\
 & \quad \} \\
 & \} \\
 & \text{for}(k = 0; k < N; k++) \\
 & A[k] = F_4(B[k]);
 \end{aligned}$$

Рис. 5. Схема модифицированного алгоритма формирования режущей части инструмента

$$\begin{aligned}
 & \text{for}(k = 0; k < N; k++) \\
 & \{ \\
 & \quad \text{for}(i = 0; i < k; i++) \\
 & \quad \quad \{x = F_1(A[i]); \\
 & \quad \quad A[j] = F_2(x); \} \\
 & \quad \text{for}(i = 0; i < k; i++) \\
 & \quad \quad \{u = F_3(B[i]); \\
 & \quad \quad B[j] = F_4(u); \} \\
 & \}
 \end{aligned}$$

Рис. 6. Схема информационных зависимостей алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен

$$\begin{aligned}
 & \text{for}(z = 0; z < LAYERS_NUM; z++) \\
 & \quad \text{for}(i = 0; i < Y_POINTS; i++) \\
 & \quad \quad \text{for}(j = 0; j < X_POINTS; j++) \\
 & \quad \quad \quad \text{for}(k = 0; k < N; k++) \\
 & \quad \quad \quad \quad \{u = F_1(A[z], B[i], C[j], D[k]); \\
 & \quad \quad \quad \quad \text{SaveToDisk}(F_2(u)); \}
 \end{aligned}$$

Рис. 7. Схема информационных зависимостей алгоритма расчета распределения поля температур по глубине поверхностного слоя

На последнем, третьем этапе выполнен анализ и распараллеливание наиболее трудоемкой операции расчета распределения поля температур по глубине поверхностного слоя. Время выполнения данной операции на персональном компьютере существенно зависит от постановки задачи и варьируется в диапазоне от нескольких минут — для простых задач — до недель, для задач с большим количеством зерен и мелким шагом по времени. Редуцированный алгоритм данной операции показан на рис. 7.

Как можно заметить, распараллеливание алгоритма может быть выполнено на произвольном количестве вычислительных узлов. Существенным фактором, влияющим на эффективность распараллеливания, является необходимость дублирования массивов A , B , C и D на вычислительных узлах и необходимость их синхронизации после завершения этапа расчета температур по глубине изделия.

Параллельный алгоритм расчета поля температур на базе технологии MPI можно описать следующей последовательностью шагов. Пусть для расчета выделено n вычислительных узлов. На каждом узле выполняется отдельный процесс программного комплекса. На первом шаге процесс P_0 , расположенный на нулевом узле, выполняет формирование режущей поверхности инструмента. На втором шаге процесс P_0 выполняет доставку подготовленной на шаге 1 режущей поверхности каждому процессу. На третьем шаге каждый процесс выполняет расчет интенсивности тепловыделения зерен. На четвертом шаге процессу назначается набор итераций для расчета распределения поля температур в соответствии с правилом: $m = (LAYERS_NUM * Y_POINTS * X_POINTS)/n$, где m — количество итераций алгоритма. Процесс выполняет расчет поля температур по глубине. На пятом шаге процесс P_0 выполняет синхронизацию результатов.

Технология MPI используется для распараллеливания обработки итераций циклов трех верхних уровней. Для параллельного выполнения цикла нижнего уровня используется технология OpenMP. Особенностью предложенного параллельного решения является дублирование операции расчета интенсивности тепловыделения зерен, выполняемой на третьем шаге, что позволяет существенно снизить накладные расходы на обмен данными по сети и уменьшить общее время работы программного комплекса.

В настоящее время проводится исследование характеристик ускорения и расширяемости программного комплекса на базе вычислительного кластера Южно-Уральского государственного университета «Скиф Урал». Получаемые результаты показывают значительное ускорение времени счета. Например, реализация 500 редукций при средних технологических входных параметрах круглого центрального шлифования с радиальной подачей ориентировочно занимает в среднем 0,5–1,2 минуты, против 520 минут для 50 редукций на персональном компьютере высокой производительности.

Литература

1. Глейзер, Л.А. О сущности процесса круглого шлифования / Л.А. Глейзер // Вопросы точности в технологии машиностроения. — М.: Машгиз, 1959. — С. 5 — 24.
2. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
3. Дьяконов, А.А. Оценка обрабатываемости материалов в процессах шлифования: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Дьяконов. — Челябинск, 2006. — 253 с.
4. ГОСТ Р 52381-2005 — Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. — М.: Стандартинформ, 2006. — 15 с.
5. Дьяконов, А.А. Исследование износа режущего профиля шлифовальных кругов: маг. дис. / А.А. Дьяконов. — Челябинск, 2005. — 122 с.
6. Кошин, А.А. Расчет температуры самоподогрева металла в зоне шлифования с учетом дискретного характера контакта круга и детали / А.А. Кошин, В.И. Ключко // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. науч. тр. — Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1980. — С. 23 — 26.
7. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 608 с.
8. Lamport L. The coordinate method for the parallel execution of DO-loops. // Commun. ACM. — 1974. — V. 17, issue 2. — P. 83 — 93.

Анатолий Александрович Кошин, доктор технических наук, профессор, кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация).

Леонид Викторович Шипулин, аспирант, кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), shipulin86@mail.ru.

MSC 97M50

Temperature and Force Stochastic Models in Grinding Processes and Implementation of Them by Parallel Computing

A. A. Koshin, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),

L. V. Shipulin, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Considered the stochastic models of the temperature field in the cutting zone and the radial component of cutting force in grinding. Stochastics the interaction of the tool and the workpiece due to the probabilistic structure of the wheel, due to its production technology. We consider the auxiliary model, necessary for the proper functioning of the basic models. Was created information scheme of software complex that includes all basic modules and their relationships. The necessity of application of parallel technologies. Showing the scale of the calculations and the need to use parallel technology. Structurally, the program is divided into three blocks, each block of data is a set of nested loops (the depth of 2 to 4). In this cycle, starting from a depth of 2 admit the equivalent transformation to a form containing independent iterations. The cycle of top-level parallelism allows synchronization with the condition of the input data at the beginning of each iteration. In a parallel implementation of the software system used a combination of technologies like MPI and OpenMP.

Keywords: grinding, modeling, parallel computing.

References

1. Gleyzer L.A. On the Essence of the Process of Cylindrical Grinding [O sushchnosti protsessa kruglogo shlifovaniya]. *Issues of Accuracy in the Mechanical Engineering*, 1959. pp. 5 – 24.
2. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley [The Performance of the Process of Grinding of Steel Parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 280 p.
3. D'yakonov A.A. Otsenka obrabativayemosti materialov v protsessakh shlifovaniya [Evaluation of Workability of Materials in the Process of Grinding]. Chelyabinsk, Izd. SUSU, 2002.
4. GOST R 52381-2005 – Abrasives. Grain Size and Grain Grinding of Powders. Control of Grain Structure. Moscow, 2006. 15 p.
5. D'yakonov A.A. Issledovanie iznosa rezhushchego profilya shlifoval'nykh krugov: Magisterskaya dissertatsiya [Investigation of Wear of the Cutting Profile of Grinding Wheel: Master's Thesis]. Chelyabinsk, 2005. 122 p.
6. Koshin A.A., Klochko V.I. Calculation of Self-heated Temperature of the Metal in the Grinding Zone, Taking Into Account the Discrete Nature of the Contact Circle and Details [Raschet temperatury samopodogreva metalla v zone shlifovaniya s uchetom diskretnogo haraktera contacta kruga i detali]. *Progressivnaya tekhnologiya chistovoy i otdelochnoy obrabotki* [Advanced technology finishing and finishing process], 1980. pp. 23–26.
7. Voevodin V.V. Parallel'nie vychisleniya [Parallel Calculations]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2004. 608 p.
8. Lamport L. The Coordinate Method for the Parallel Execution of DO-loops. *Commun. ACM*, 1974, vol. 17, Issue 2, pp. 83 – 93.

Поступила в редакцию 23 ноября 2011 г.