

# Исследование тепловых процессов в зоне резания методом функционально-воксельного моделирования

А.А. Сычева,  
бакалавр, *sycheva.a@rambler.ru*,  
МГТУ «Станкин», г. Москва,  
А.М. Плаксин,  
асп., инж., *a.m.plaksin@gmail.com*,  
ИПУ РАН, г. Москва

В работе изложена проблема формирования геометрии детали за счет влияния тепловых процессов во время механической обработки. Современные этапы разработки технологии производства редко включают исследование тепловых процессов, но при необходимости, используют метод конечных элементов. Это ведет к упрощению исходной модели, а значит и снижению достоверности вычисления. В работе представлен поход к исследованию процесса обработки с учетом тепловых воздействий методом функционально-воксельного моделирования, позволяющий компенсировать недостатки традиционного подхода.

The problem of forming the geometry of a part due to the influence of thermal processes during machining is presented. Modern stages of development of production technology rarely include the study of thermal processes, but if necessary, use the finite element method. This leads to a simplification of the original model, and hence a decrease in the reliability of the calculation. The paper presents a campaign to study the process of processing with allowance for thermal effects by the method of functional-voxel modeling, which makes it possible to compensate for the shortcomings of the traditional approach.

## Введение

Механическая обработка детали в настоящее время является одним из распространенных способов достижения заданной геометрии и включает в себя такие виды обработки, как сверление, хонингование, точение, растачивание, шлифование, сверление, фрезерование и др. Обработка деталей ведется на станках с ЧПУ с минимизацией количества базирований в связи с ростом требований к качественной составляющей формы детали (исключение концентраторов напряжений, ужесточенные допуски на размеры, шероховатость).

Процедуру составления управляющих программ доверяют компьютерной системе, так как эту процедуру выполнять вручную нецелесообразно вследствие сложности геометрии и размеров детали. Часто в роли такой компьютерной системы выступает SolidWorks (модуль SolidCAM, Pro/ENGINEER и т.п.).

Алгоритм процесса создания программы выглядит примерно следующим образом: загрузка разработчиком твердотельной модели в систему, выбор обрабатываемой поверхности, назначение мощностных характеристик, режимов обработки, выбор инструмента. В результате получается код. Выбор проектирования оснастки и схемы базирования при этом ложится на плечи разработчика.

В таких сферах применения, как например космическая и радиолокационная промышленность, важнейшую роль играет точность геометрии. Именно поэтому на конечную форму детали не должны влиять процессы, происходящие во время обработки. При механической обработке невозможно избежать нагрева или пластических и упругих деформаций. Разработчику для корректировки траектории движения инструмента приходится вновь загружать модель в уже иной модуль системы, если таковой имеется, зачастую создавая модель с заведомо вносимой погрешностью, провести моделирование какого-либо процесса и вручную скорректировать траекторию инструмента в зависимости от результата моделирования [1].

## 1. Тепловые процессы при механической обработке

В процессе резания металлов работа затрачивается на упругие и пластические деформации, возникающие в слое, прилегающем к поверхности резания и обработанной поверхности, в срезаемом слое, а также на преодоление трения по передней и задней поверхностям резца.

Механическая работа резания переходит в тепловую энергию, в результате чего процесс резания металлов сопровождается значительным тепловыделением. Выделяют несколько основных источников возникновения тепла в зоне резания (см. рис. 1):

1.  $Q_1$  – внутреннее трение между частицами срезаемого слоя в результате его пластической деформации при образовании стружки;
2.  $Q_2$  – трение стружки о переднюю поверхность инструмента;
3.  $Q_3$  – трение обработанной поверхности и поверхности резания по задним поверхностям инструмента.

При этом не происходит накопления тепла, возникающего в процессе резания, в источниках его образования. Тепло из зоны резания распространяется от точек с более высокой температурой к точкам с низкой температурой в указанных направлениях (см. рис. 1) [2]:

1.  $q_1$  – отвод тепла стружкой обрабатываемого материала;
2.  $q_2$  – отвод тепла внутрь обрабатываемой заготовки;
3.  $q_3$  – отвод тепла внутрь обрабатывающего инструмента;

4.  $q_4$  – отвод тепла в окружающую среду.

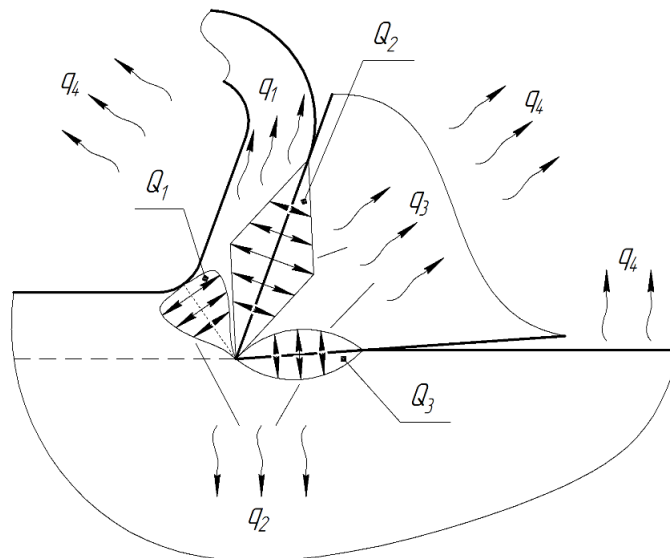


рис. 1 Источники тепла в зоне резания

Исходя из высказанного, можно выразить тепловой баланс процесса резания в виде уравнения (1).

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (1)$$

В ходе многочисленных исследований было установлено, что доли тепла, распространяющегося в детали и инструменте, а также отводимого стружкой и окружающей средой, зависят от многих факторов, в том числе от геометрии режущего инструмента, режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого материала и внешних условий, в которых протекает процесс резания.

Возрастая в начале обработки до какого-то определенного значения, температура в зоне резания устанавливается постоянной, при которой выделение и отвод тепла по указанным направлениям равны друг другу. Устанавливается так называемый стационарный тепловой режим. Температура рабочей части инструмента и обрабатываемой заготовки представляет наибольший интерес для практических целей. Тепло, отводимое заготовкой увеличивает ее температуру, что вызывает ее коробление, температурное изменение размеров, зачастую являющееся причинами брака.

Несмотря на относительную незначительность теплоты, переходящей в инструмент, из-за ее концентрации в малых объемах инструмента происходит сильный разогрев в этих объемах, а также снижение износоустойчивости и режущих свойств инструмента. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению доли тепла, переходящего в инструмент. Однако температура в зоне резания может увеличиваться до значений, близких к температуре красностойкости материала инструмента, в связи с возрастанием абсолютного количества тепла (см. рис. 2) [3].

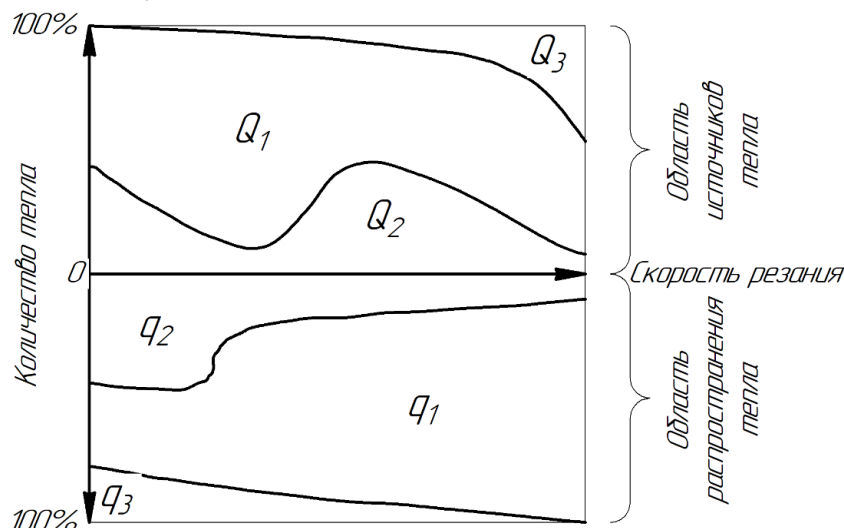


рис. 2 Зависимость образования и распределения теплоты в материале от скорости резания

### 1.1. Зависимость температуры от режимов резания

В ходе многочисленных исследований зависимости температуры от различных факторов было выявлено, что температура в зоне резания зависит от многих условий. В качестве примеров таких условий можно привести режим резания, физико-механические свойства металла заготовки, геометрию режущего инструмента. Среди составляющих режима резания скорость резания оказывает наибольшее влияние на температуру резания, подача влияет в меньшей степени. При этом влияние глубины резания на температуру в зоне резания практически не

обнаруживается. Передний угол и главный угол в плане, а также радиус закругления при вершине, сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок на вершине режущего лезвия инструмента оказывают наиболее сильное влияние на температуру в зоне резания среди геометрических параметров режущей части инструмента.

В ходе различных исследований также был предложен ряд эмпирических и аналитических формул для расчета температуры в зоне резания. Первые формулы довольно просты, их структура зависит от числа учтенных факторов, влияющих на величину температуры в зоне резания. Аналитические формулы напротив сложны и зачастую включают в себя большое количество неизвестных величин. Однако эмпирические формулы справедливы только в пределах условий проведения эксперимента. Наиболее общими являются формулы вида (2) [2, 4].

$$\theta = C_{\theta} t^{x_{\theta}} s^{y_{\theta}} u^{z_{\theta}} \quad (2)$$

где:

- $\theta$  – температура в зоне резания,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t$  – глубина резания,  $\text{MM}$ ;
- $s$  – подача,  $\frac{\text{MM}}{\text{об}}$ ;
- $u$  – скорость резания,  $\frac{\text{M}}{\text{МИН}}$ ;
- $C_{\theta}$  – константа, учитывающая условия резания;
- $x_{\theta}$ ,  $y_{\theta}$ ,  $z_{\theta}$  – показатели степени, показывающие степень влияния каждого элемента режима резания на температуру в зоне резания.

## 2. Моделирование тепловых процессов при механической обработке

Все существующие подходы к моделированию тепловых процессов при механической обработке можно свести к единообразному решению, представляющему собой определенный алгоритм действий:

1. Построение модели твердотельной детали;
2. Загрузка построенной твердотельной модели в САМ-модуль (SolidCAM, ГЕММА и др.);
3. Построение логики обработки детали на станке с ЧПУ;
4. Перевод модели в полигональную (процесс триангуляции);
5. Загрузка триангулированной модели в модуль теплового анализа (SolidWorks Simulation);
6. Проведение теплового анализа узких мест детали;
7. Корректирование логики и режимов обработки на основе теплового анализа.

При этом по ряду причин полученное решение не способствует получению однообразной картины процесса обработки: задача корректирования режимов обработки и траектории движения инструмента ложится на плечи технолога-программиста, что вносит в процесс создания технологии обработки человеческий фактор; первичная логика создания управляющей программы опирается на САМ-системы и экспертное мнение технолога-программиста; вносится погрешность в процесс моделирования обработки и исследования тепловых явлений в связи с использованием как минимум двух транспонированных моделей детали [1, 5].

Необходимость учёта природы тепловых процессов при механической обработке еще больше усложняет оценку тепловых влияний при их моделировании.

При моделировании тепловых процессов при механической обработке также необходимо учитывать природу их возникновения, что еще больше усложняет оценку тепловых влияний. На рис. 3 представлены подходы к моделированию тепловых процессов при фрезеровании, учитывающий следующие факторы возникновения тепловых воздействий:

- пластические деформации в зоне резания;
- распределение напряжений;
- деформации сдвига.

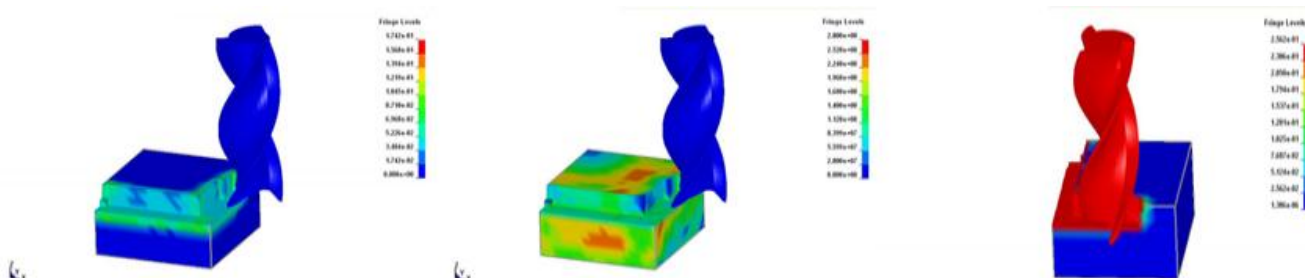


рис. 3 Моделирование различной природы возникновения тепловых явлений при механической обработке

## 3. Функционально-воксельная модель в задачах исследования тепловых процессов в зоне резания при механической обработке

Метод функционально-воксельного моделирования позволяет иметь помимо точной информации о геометрии детали также информацию о внутренней структуре материала (формирование пор, неравномерность отжига или закалки), качестве поверхности (волнистость, шероховатость и пр.), иную информацию о материале: предел на растяжение, удельная теплопроводность и др.

Такую информацию, как пластические или упругие деформации при воздействии на модель и распространение теплового потока внутри материала от источника и его теплоотдача во внешнюю среду, метод функционально-воксельного моделирования позволяет хранить в аналитическом виде внутри модели, не трансформируя исходную (см. рис. 4). Список зависимостей можно дополнять любой необходимой характеристикой или же использовать их совместно, но самым важным аспектом является возможность хранения всей информации в единой связанной модели [1, 6].

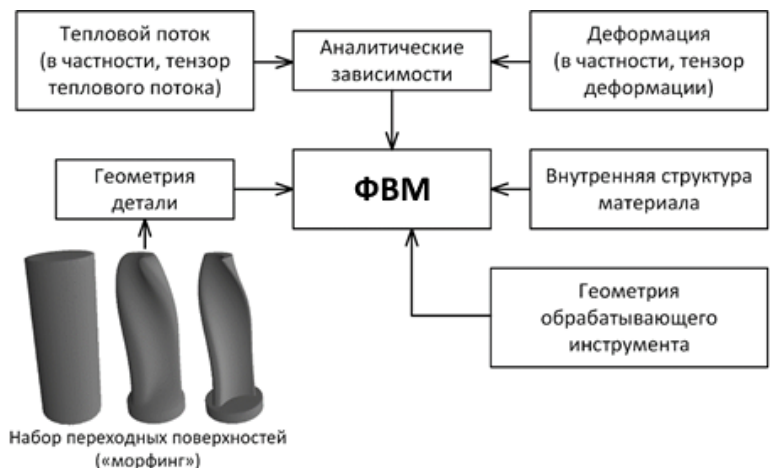


рис. 4 Информация, хранящаяся внутри ФВМ

К примеру, в состав модели, представленной на рис. 1, входит элемент детали с тремя источниками теплоты. Первой задачей необходимо описать контур элемента детали в составе с элементом стружки. Результатом описания в специфике функционально-воксельного моделирования являются четыре M-образы, отражающие локальные геометрические характеристики объекта по оси «X», «Y», «Z» и расстояния от начала координат (см. рис. 5, 6).

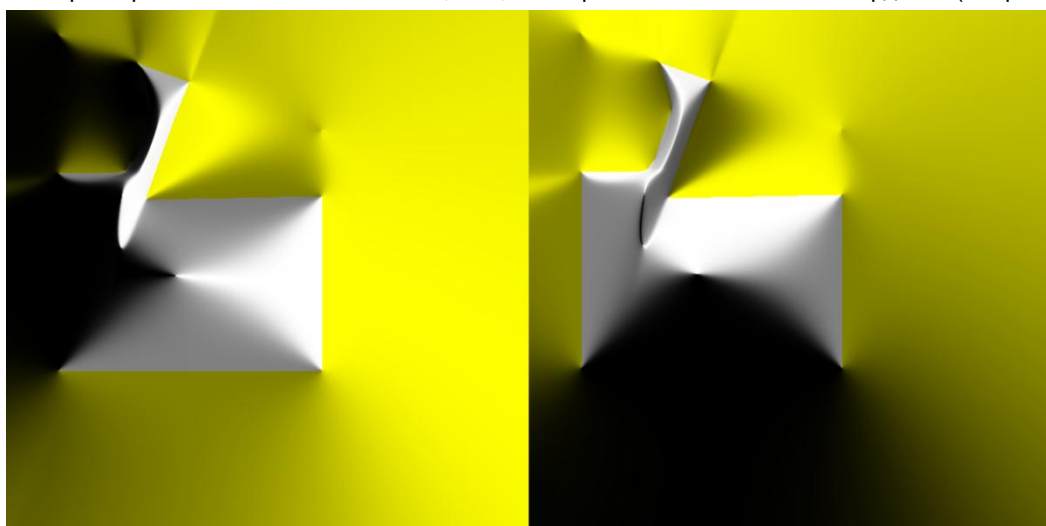


рис. 5 M-образы по оси «X» и по оси «Y»



рис. 6 M-образы по оси «Z» и расстояния от начала координат

В качестве другого примера рассмотрим более простую модель. На рис. 7 можно наблюдать реализацию стационарного теплового потока в двумерном пространстве, полученную методом конечных элементов (слева) и методом функционально-воксельного моделирования (справа). Реализация методом функционально-воксельного моделирования ничуть не уступает первой, однако применение данного метода позволяет избежать недостатков метода конечных элементов. В том числе, метод функционально-воксельного моделирования позволяет работать с точечным приложением силы или тепла, что не позволяет метод конечных элементов.

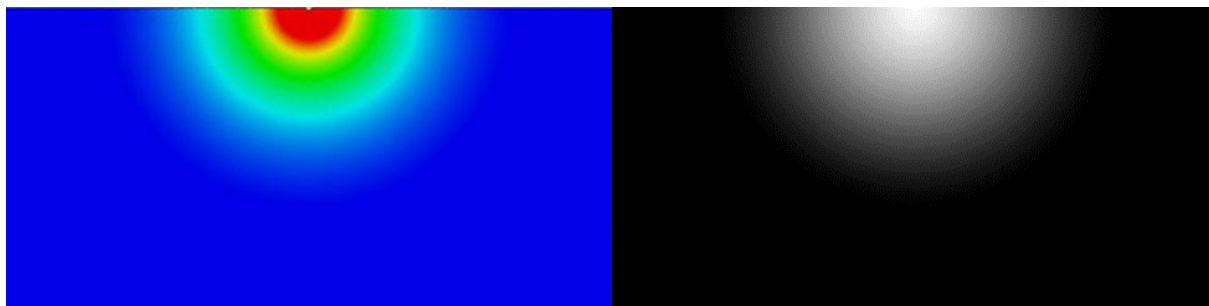


рис. 7 Реализация теплового потока МКЭ (слева) и МФВ (справа)

В данной работе представлена первая реализация применения метода функционально-воксельного моделирования для описания тепловых процессов в зоне резания. В дальнейшей перспективе использование и развитие данного метода позволит полностью описывать тепловые явления, возникающие в зоне резания, а также моделировать процесс механической обработки металлов в динамике.

### Литература

1. Плаксин А.М., Толлок А.В. Функционально-воксельная модель в задачах интеллектуализации систем автоматизированного проектирования / Вестник МГТУ Станкин. М.: МГТУ Станкин, 2017. № 2 (41). С. 75-78.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. 279 с. ил.
3. Трусов В.Н., Скуратов Д.Л., Законов О.И., Шикин В.В. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник СГАУ. 2011. №3-1. С.57-62.
4. Толлок А.В., Плаксин А.М., Васенков С.В. Применение воксельных структур в задачах интеллектуализации систем автоматизированного проектирования / Труды Международной школы молодых ученых и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. Металлообработка (Москва, 2016). М.: ФГБОУ ВО МГТУ "Станкин", 2016. С. 67-69.
5. Р. И. Ахметшин, М. Ш. Мигранов, А. А. Верещака Моделирование тепловых процессов при резании инструментом с функциональными покрытиями // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. №2. С.116-119.
6. Толлок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. М.: Физматлит, 2016. – 112 с.