

УДК 65.012.122

С.А. БОЛСУНОВСКИЙ², В.Д. ВЕРМЕЛЬ¹, В.В. ЗИНЯЕВ¹¹Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Москва, Россия²Московский физико-технический институт (МФТИ), Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ (ТИПА 30ХГСА) ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Рассматриваются результаты расчетно-экспериментальных исследований, направленных на определение температуры резания при высокоскоростном фрезеровании легированной стали 30ХГСА. Наряду с оценкой температуры показано распределение тепла, выделяемого в процессе обработки.

высокоскоростное фрезерование, технологические параметры, тепловыделение, тепловое уравнение, распространение тепла в среде, термопарные измерения, тепловизионные измерения

Введение

При высокоскоростной обработке материалов важной задачей является достижение максимальной скорости резания при сохранении интенсивности износа режущего инструмента. В этой связи представляет интерес определение физических условий резания с целью определения рациональных рекомендаций для построения технологического процесса обработки. До последнего времени два взгляда на механизм снижения силовых и энергетических факторов резания материала при высокоскоростном фрезеровании.

Первый, подтвержденный при обработке древесины, основан на предположении перехода к хрупкому разрушению, требующему меньших энергетических затрат. Второй, предполагает разогрев материала в зоне резания до температур, существенно больших, чем при традиционном фрезеровании, и соответствующее снижение затрат на пластическую деформацию.

Именно он, по нашему мнению, представляется соответствующим физике обработки металла. На его основе было проведено настоящее исследование, направленное на оценку температуры резания.

Учитывая сложность непосредственного замера температуры в зоне резания, она определялась косвенно. Для этого была построена математическая модель распространения тепла в заготовке на основе метода источников, традиционно применяемого в технологической теплофизике.

В соответствии с ней спланировано проведение эксперимента с замером поля температур на системе термопар, а также с помощью тепловизионной установки (тепловизора). В результате получена оценка температуры в зоне резания и ее распределение в процессе высокоскоростной фрезерной обработки.

1. Постановка задачи

Предполагаем, что фрезеруется прямоугольная заготовка с плоским торцом ширина которой меньше диаметра фрезы. Теплофизические параметры материала заготовки (сталь 30ХГСА) $\lambda(T)$ и $C_p(T)$ известны. В качестве модели предполагаем, что зону контакта фрезы с материалом имитирует нагретый стержень – источник тепла, движущийся вдоль обрабатываемого торца заготовки (рис. 1).

Поставим задачу описания температурного поля заготовки при подводе тепла $q[Bm]$ от движущегося

источника тепла. То есть необходимо для любой точки определить $T(x, y, z, t)$. Конечной целью является определение температуры в месте расположения источника в данный момент времени. Для этого необходимо решить уравнение теплопроводности:

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + c\rho(T)\left[v_x\frac{\partial T}{\partial x} + v_y\frac{\partial T}{\partial y} + v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right], \quad (1)$$

где $T = T(x, y, z, \tau)$ – температура точки с координатами x, y, z в момент времени τ ;

v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости перемещения источника тепла.

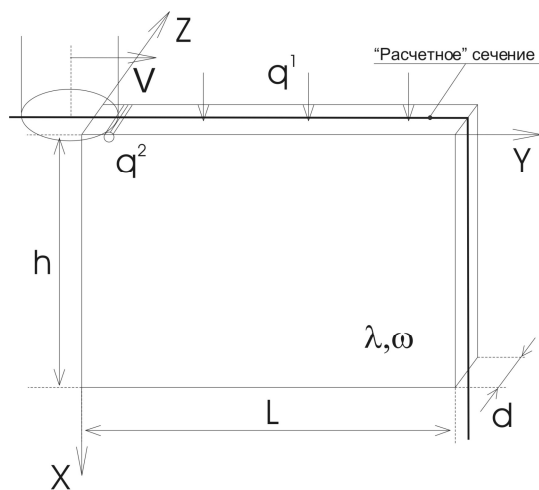


Рис. 1. Расчетная схема обработки

К уравнению (1) добавляются начальные и граничные условия, а также краевые условия, учитывающие конечные размеры тела. Для упрощения рассмотрим процесс в тонком слое, выделяемым сечением заготовки и источника, что позволяет свести задачу к двумерной (рис. 1).

В результате преобразований получаем зависимость для определения температурного поля в сечении.

2. Решение задачи

В результате интегрирования по времени (1) получаем формулу, описывающую температурное по-

ле в неограниченном теле образуемое движущимся источником. Скорость движения и излучаемая тепловая мощность могут зависеть от времени, в частности, траектория движения может быть замкнутой:

$$T(x, y, \tau) = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_0^\tau \frac{q(t)dt}{\tau-t} \exp\left[-\frac{\left[\int_0^t v(t_1)dt_1 - x\right]^2 + y^2}{4w(\tau-t)}\right], \quad (2)$$

где $q(t)$ – интенсивность теплового потока [Вт/см²];

$v(t_1)$ – скорость источника;

τ – время наблюдения.

Выражение (2) позволяет вычислить температуру на любом расстоянии для заданного момента времени. Значение T определяется при помощи численного интегрирования [1].

3. Исследование решения задачи

Расчеты распространения тепла для ряда эталонных значений мощности источника показывают, что процесс распространения является чрезвычайно медленным. Типичная изолиния температуры при прямом и обратном движении показана на рис. 2. Видно, что направление распространения тепла практически перпендикулярно торцу заготовки (направлению движения источника), за исключением краевых зон, которые могут быть исключены из рассмотрения. В соответствии с результатом можно спланировать распределение термометров по заготовке, а также рассчитать температуры в них по времени фрезерования в зависимости от заданных величин тепловыделения q .

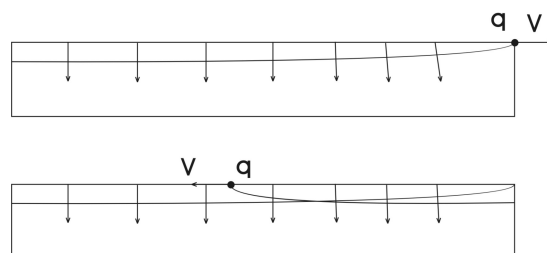


Рис. 2. Изолинии температуры и направление распространения тепла

4. Калибровка модели в эксперименте с постоянной подводимой мощностью

На рис. 3 изображена заготовка с системой термометров (термопар), используемая для первоначального эксперимента на калибровку модели и последующее фрезерование.

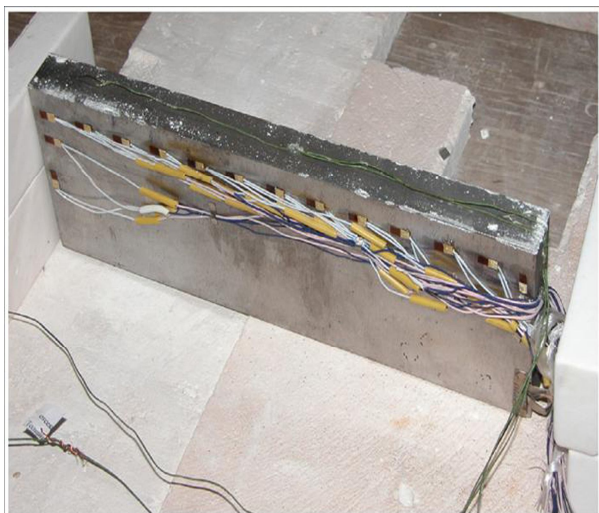


Рис. 3. Заготовка с термометрами, используемая для калибровки и первоначального эксперимента

К торцу заготовки, подлежащему фрезерованию был приложен нагреватель, позволяющий задавать различные уровни тепловой мощности.

На рис. 4 построено сравнение усредненных температур термометров и их расчетное значение по математической модели разд. 2. Видно, что при постоянном нагреве результаты близки.

Таким образом, по значению температуры, замеренной на термометрах можно оценивать тепловыделение на источнике и фрезе при обработке материала.

Обратный расчет для установленного тепловыделения позволяет получить поле температур. На рис. 5 показаны кривые расчетной температуры на одной из термопар, удаленной от обрабатываемого торца заготовки и полученные в результате расчета при подобранной тепловой мощности.

5. Результаты расчетно-экспериментальных исследований

Важнейшим результатом выполненных экспериментов стала оценка уровня тепловой мощности, выделяемой при резании в зависимости от технологических параметров – ширины и глубины резания, подачи на зуб, оборотов.

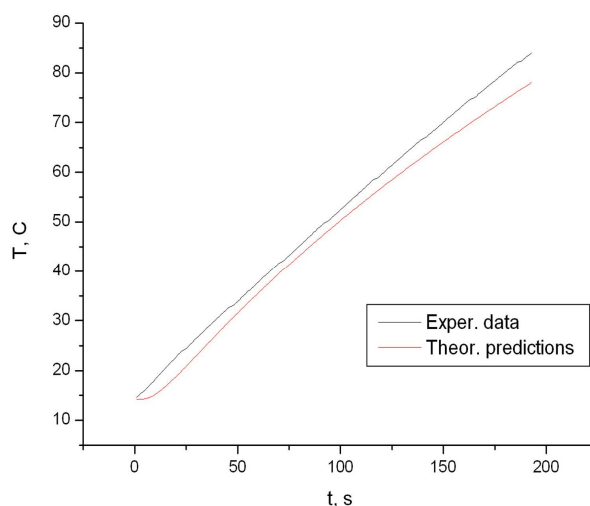


Рис. 4. Сравнение усредненных температур и их расчетное значение по математической модели

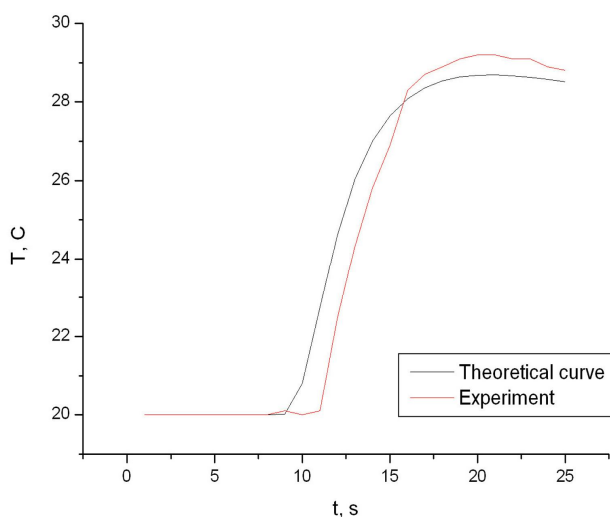


Рис. 5. Кривые расчетной температуры на одной из термопар

Выявлено, что основным параметром, влияющим на тепловыделение является скорость резания. Другие параметры (ширина и глубина резания, подача на зуб) определяют усилия резания. Расчетно-

экспериментальная зависимость тепловыделения по скорости резания приведена на рис. 6. Соответствующая оценка температуры в зоне резания составляет 700 – 1200 С. Данная оценка близка к полученной в работе [2].

На рис. 7 изображен тепловизионный портрет процесса высокоскоростной фрезерной обработки. На изображении хорошо виден тепловой след за движущейся фрезой, близкий к модельному (рис. 2).

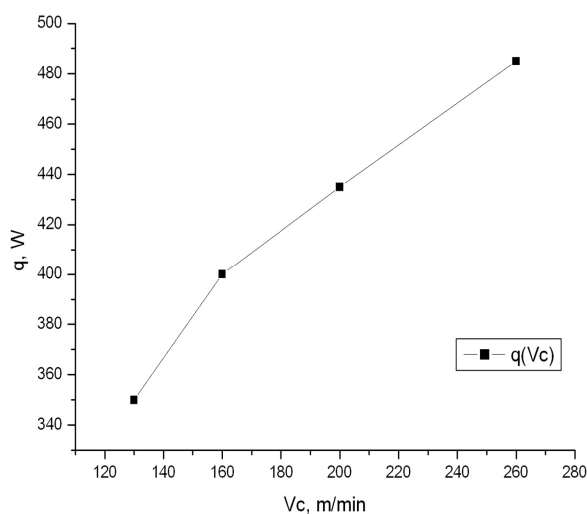


Рис. 6. Расчетно-экспериментальная зависимость тепловыделения по скорости резания

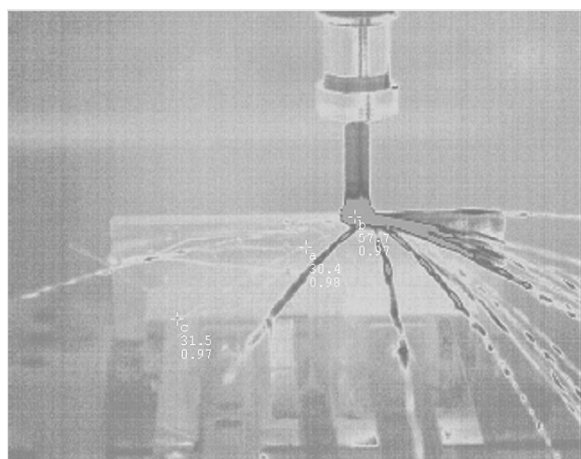


Рис. 7. Тепловизионный портрет процесса высокоскоростной фрезерной обработки

Температура заготовки в окрестности зоны резания не превышает 150 С, причем изменяется незначительно при увеличении скорости резания.

Это связано с тем, что при повышении скорости и соответственно минутной подачи сокращается время контакта разогретой режущей кромки с заготовкой. Видно, что основной объем тепла уносится с нагретой стружкой.

Первыми практическими рекомендациями стали исключение применения СОЖ, ускоряющего разрушение инструмента вследствие термической усталости (цикл нагрев-охлаждение), а также необходимость обеспечения удаления стружки для предотвращения перегрева фрезы.

Заключение

Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки температуры резания при высокоскоростной фрезерной обработке стали. В его развитие предполагается непосредственное измерение температуры в зоне резания для уточнения разработанной математической модели и дополнение сформированного инструментария средствами измерения усилий резания и вибраций. Окончательной целью является обоснованное определение рациональных режимов высокоскоростного фрезерования для данных инструмента и материала детали.

Литература

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение. – 458 с.
2. Katsuyoshi Karino "Trouble Shooting for cutting. Prediction Information to Improve Production Techniques". Mitsubishi Materials Corporation Tsukuba Plant, Kogyo Chosakai Publishing Co. Ltd, 1998.

Поступила в редакцию 5.05.2005

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Н.Г. Буньков, Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Москва.