

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗНОСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

Е.Н. Каширская, А.В. Орлов

Рассматривается возможность определения предельного износа металлорежущего инструмента на основе дистанционного измерения температуры резания. Момент достижения предельного износа определяется по резкому возрастанию температуры в зоне резания.

Ключевые слова: усталостный износ инструмента, предельный износ, температура резания, точка перегиба.

Эффективность машиностроительного производства определяется многими факторами, среди которых важное место занимает металлорежущий инструмент. Большая часть отказов инструмента (до 75 %) происходит вследствие износа режущих пластин.

В последнее время большое внимание уделяется достаточно общим математическим моделям, позволяющим описать технологические процессы разрушения инструментальных материалов. Накоплен большой объем статистических данных по износу и разрушению металлорежущего инструмента. Эти данные весьма разнородны, вследствие чего трудно систематизировать и предложить формальное описание процессов. Среди многочисленных работ описания механизмов разрушения инструментальных материалов существуют исследования, касающиеся самых различных аспектов этой проблемы. Опубликованные к настоящему времени экспериментальные данные позволяют разработать методику определения усталостного износа инструмента под воздействием точечных ударов абразивных вкраплений в обрабатываемом материале и связать эти ударные воздействия с изменением теплового поля вокруг режущей точки [2]. Динамическое изменение теплового поля сопровождается изменением температуры инструмента, что может быть зафиксировано с помощью приборов.

В настоящем исследовании обосновывается взаимосвязь кривой износа металлорежущего инструмента и температурной кривой, на основе чего разрабатывается методика определения точки перегиба на графике температуры в зоне резания. Момент достижения точки перегиба на температурной кривой соответствует началу катастрофического износа

инструмента и является необходимым и достаточным условием смены инструмента.

Период стойкости металлорежущего инструмента может оцениваться различными параметрами. В настоящей статье предлагается его находить на основе анализа температурных процессов, возникающих в зоне резания, так как способность инструментального материала сохранять режущие свойства во многом определяется не только силовыми, но и температурными нагрузками, возникающими при обработке резанием. Это определяется связью износа режущей кромки инструмента с целым комплексом многочисленных физико-механических свойств как обрабатываемого, так и инструментального материалов. Кроме того, износостойкость инструмента существенно зависит от изменения этих физико-механических характеристик, на которые явным образом влияет температура в зоне резания. Например, в работе [1] на основе анализа физико-механических характеристик обрабатываемых материалов определяется температура экстремальных значений этих характеристик. В работе [3] обосновывается, что наибольшее влияние на работоспособность режущего инструмента оказывает температура в зоне резания.

Стандартное уравнение теплового баланса, рассматриваемое в теории резания, имеет следующий вид:

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

где Q_1 - количество тепла, эквивалентное энергии, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании и формировании поверхностного слоя;

Q_2 - количество тепла, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности клина и деформированного материала;

Q_3 - количество тепла, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности клина при переходе деформированного материала в поверхностный слой детали;

q_1 - количество тепла, уходящее в стружку;

q_2 - количество тепла, идущее в деталь;

q_3 - количество тепла, переходящего в режущий инструмент;

q_4 - количество тепла, передающееся окружающей среде.

Каждая составляющая уравнения теплового баланса, так или иначе, влияет на изменение температуры в зоне резания. Износ металлорежущего инструмента приводит к увеличению сил резания и, как следствие, к росту сил трения на передней и задней поверхностях режущего инструмента, что вызывает повышение температуры. Таким образом, темп УДК 621.9.02 температура зависит от величины износа и от времени протекания физического процесса резания.

В период нормального износа температура будет повышаться равномерно. При достижении катастрофического износа должно начаться резкое возрастание температуры.

Абсолютная величина температуры зависит, кроме износа, от материала заготовки и инструмента, режимов резания, шероховатости обрабатываемой поверхности, от геометрии инструмента, от использования смазочно-охлаждающих составов. При чистовой обработке заготовки припуск, как правило, равномерен, поэтому его незначительные колебания не могут существенно изменять силу резания. Другие параметры являются постоянными для каждого конкретного процесса резания, поэтому рост температуры при конкретном технологическом процессе резания обусловлен только износом инструмента, и, следовательно, определение начала катастрофического износа на основе контроля температуры является правомочным. Формально это можно записать следующим образом: изменение температуры является неизвестной функцией от изменения сил трения. При этом необходимо учесть инерционную составляющую повышения температуры и всевозможные внешние факторы, влияющие на изменение температуры.

Так как износ инструмента зависит от времени резания, изменение температуры тоже должно зависеть от времени. Соответственно, появление ускорения роста температуры может свидетельствовать о наступлении катастрофического износа. При таком подходе абсолютное значение температуры не явля-

ется существенным; главное – отследить ее динамику.

Теперь вернемся к периоду нормального износа. Накопление износа идет равномерно (изображается на кривой износа прямой линией), следовательно, температура тоже является линейной функцией времени. Переход к резкому возрастанию температуры при достижении предельного износа может произойти лишь после достижения точки перегиба на температурной кривой, что соответствует нулю второй производной для зависимости температуры от времени. Другими словами, появление ускорения роста температуры означает выход второй производной из нуля – появление первого положительного ненулевого значения. На основе описанного процесса можно построить диагностическую систему контроля наступления предельного износа инструмента.

Существующие методы измерения температуры резания используют искусственную, полусинтетическую или естественную термопары, что не может считаться технологичным при применении их в реальных производственных условиях. Единственным, на наш взгляд, реальным способом определения температуры в производственных условиях является ее дистанционное измерение. Но такой метод не дает возможности фиксировать весь объем тепла, образующегося в зоне резания, поэтому необходимо обосновать возможность применения дистанционных измерений в какой-либо части теплового поля для получения данных о характере изменения температуры в зоне резания. Для этого рассмотрим тепловую задачу.

В классической постановке двумерная тепловая задача описывается следующим уравнением:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала, Вт/м²К,

T – температура, К,

x, y – координаты, м.

Для изучения пространственно-временного изменения температуры необходимо найти зависимости $T = T(x, y, z)$, где x, y, z - пространственные координаты в декартовой системе, t - время.

Для решения задач, связанных с нахождением нестационарного температурного поля, необходимо иметь дифференциальное уравнение теплопроводности, которое дает зависимость между температурой, временем и

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗНОСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

координатами элементарного объема. В декартовой системе координат уравнение теплопроводности для изотропных материалов имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\omega}{c\rho}, \quad (3)$$

где λ - коэффициент теплопроводности,
 c - теплоемкость,
 ρ - плотность,
 ω - мощность тепловыделения.

Для нахождения единственного решения дифференциального уравнения в частных производных необходимо задать начальные и граничные условия.

Начальные условия (распределение температуры в начальный момент времени) является равномерным:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (4)$$

Для задания граничных условий рассмотрим различные способы их задания.

1. Граничное условие первого рода задает распределение температуры по поверхности в любой момент времени, т. е.

$$T|_s(t) = f(t), \quad (5)$$

где $T|_s(t)$ - температура поверхности, которая нам не известна, следовательно, граничные условия первого рода задать невозможно.

2. Граничное условие второго рода состоит в задании плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела как функции времени, т. е.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s(t) = q(t), \quad (6)$$

где n - нормаль к граничной поверхности S . Параметры теплового потока нам не известны, поэтому граничные условия второго рода задать невозможно.

3. Граничное условие третьего рода характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой (закон Ньютона). В этом случае количество тепла, передаваемого в единицу времени с единицы площади поверхности тела в окружающую среду (или в контактирующие тела) с температурой T_c прямо пропорционально разности температур между поверхностью тела и окружающей средой (телами), т. е.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s = \sigma(T|_s - T_c), \quad (7)$$

где σ - коэффициент теплообмена. Так как температура контактирующей с инструментом

заготовки неизвестна, применить граничные условия третьего рода сложно.

4. Граничное условие четвертого рода соответствует теплообмену поверхности тела с окружающей средой или теплообмену соприкасающихся твердых тел. При этом имеют место соотношения:

$$T|_s = T_c|_s, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s = -\lambda \frac{\partial T_c}{\partial n}|_s, \quad (8)$$

то есть на границе соприкосновения обеспечивается равенство температур и равенство потоков тепла. Это и есть применимые к нашей задаче граничные условия.

Теперь нужно решить тепловую задачу, то есть подобрать решение дифференциального уравнения, удовлетворяющее начальным и граничным условиям, в качестве которых предлагается брать данные о температуре в конкретной точке, полученные дистанционным измерением.

Обработка резанием производится режущим инструментом сложной геометрической формы, имеющим конечный объем. Это же в большинстве практических случаев относится и к заготовке. Кроме того, материалы как инструмента, так и заготовки, имеют, как правило, нелинейные физико-механические характеристики и достаточно произвольные граничные условия.

Обычно для решения инженерных тепловых задач применяются численные методы, хотя наша задача может быть решена аналитически методом Фурье. Его применение требует введения целого ряда допущений. Решение ищется в виде суммы бесконечного ряда. Такое решение позволяет вычислить значение температуры в любой конкретной точке в произвольный момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василега Д.С. Повышение работоспособности инструментов оптимизацией по температуре резания: Дис. к.т.н. – Тюмень, 2009.
2. Каширская Е.Н. Влияние усталостных напряжений на стойкость металлорежущего инструмента. // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Труды II междунар. конф. (в 2-х томах). – Том 1. - Ереван, 2010.
3. Костив В.М. Влияние механических характеристик инструментальных твердых сплавов на работоспособность металлорежущих инструментов: Дис. ... к.т.н. – Тюмень, 2002.

*Каширская Е.Н., к.т.н., доцент,
 Орлов А.В., аспирант,
 ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», г. Москва*