3. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Расчёт мощности гидродинамических потерь и жидкостнокольцевых машинах. Труды МВТУ №146 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. - М.: 1971. С.31-38
4. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Влияние окружной скорости колеса жидкостнокольцевого вакуум-компрессора на его энергетические характеристики. Труды МВТУ №158 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты.- М. 1973. С.37-41
5. В.Д. Лубенец, И.В. Автономова Теоретическое исследование влияния относительного эксцентриситета на производительность и удельную мощность жидкостнокольцевых вакуум компрессоров.Труды МВТУ №158 Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты. - М.: 1973. С.41-47
6. Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев, Н.К. Никулин, П.И. Пластинин Механические вакуумные насосы.- М.: Машиностроение, 1989.- 288с.
7. T.A. Tsorayev. I.V. Avtonomova. Calculation of Liquid Ring Shape in Liquid-Ring Machine.OIL AND GAS ENGINEERING (OGE-2018) Omsk, RussiaPublished by the American Institute of Physics p.03026-1 - 03026-11.

Анухин И.В., Любомудров С.А., Журавлева И.Н.

Оценка точности тепловизионного метода измерения температуры в зоне резания при точении

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/lj-04-2019-220

idsp: ljjournal-04-2019-220

Аннотация

В статье предложен тепловизионный метод измерения температуры в зоне резания при обработке на токарном станке и проведена оценка его точности. Применение тепловизора модели BALTECH TR-01500 позволило записать термограмму выхода резца из зоны резания в момент освобождения его от стружки, и тем самым найти температуру передней поверхности резца. Предварительно определялись коэффициенты излучения резца и стружки, их значения заносились в память тепловизора.

Ключевые слова: тепловизор, температура, термограмма, резец, стружка, коэффициент излучения, токарный станок.

Abstract

The article offers a method for temperature measurement in the cutting zone on a turning lathe. Also the accuracy evaluation was made. Application of thermal imager BALTECH TR-01500 allowed to record the thermogramm of the cutter running out from the cutting zone at the moment of releasing the cutter face from chips. The values of the coefficients of thermal emissivity of the cutter and chips were recorded in the memory of the thermal imager.

Keywords: thermal imager, temperature, thermogramm, cutter, metal chips, coefficient of thermal emissivity, turning lathe.

В условиях повышения нагрузок и температур, действующих в узлах современных машин, все большее распространение получают специальные марки нержавеющей, износостойких и жаропрочных сталей и сплавов. При обработке подобных материалов стойкость режущего инструмента часто не превышает 3...10 минут.

Основной задачей при обработке подобных материалов и сплавов становится выбор в производственных условиях режущего инструмента, его геометрических параметров и режимов резания, при которых износ режущего инструмента был бы минимален, а качество обработки приемлемо.

Для проверки гипотезы и реализации метода ускоренного определения оптимальных режимов резания в условиях производства, прежде всего, требуется надежный, точный и удобный способ измерения температуры в зоне резания.

Метод ускоренного определения оптимальных режимов резания, т.е. таких режимов, при которых интенсивность размерного износа режущего инструмента минимальна, предложенный А.Д. Марковым, в настоящее время с появлением новых сталей и сплавов становится особенно актуальным.

Метод основан на найденной А.Д. Марковым закономерности постоянства оптимальной температуры резания [3]. Было установлено, что у каждой пары «обрабатываемый материал – материал режущего инструмента» существует одна температура резания, которая является оптимальной (соответствует минимальной интенсивности размерного износа), и не зависит от различных комбинаций скорости резания, подачи, глубины резания и от геометрических параметров режущей части инструмента.

Была высказана гипотеза, что скорость износа режущего инструмента пропорциональна разности твердостей режущего и обрабатываемого материала при определенной температуре в зоне резания. Чем больше разность твердостей режущего и обрабатываемого материалов, тем меньше скорость износа.

Среди многочисленных способов измерения температуры резания можно выделить следующие: калориметрический метод, метод термокрасок, способ измерения температуры в зоне резания с помощью термопар, способ естественной термопары, способ измерения температуры верхней поверхности стружки.

Анализ существующих способов измерения температуры в зоне резания показал, что ни один из перечисленных способов не подходит для решения поставленной задачи по ускоренному подбору режимов резания в производственных условиях.

На кафедре «Технология машиностроения» СПбГПУ для отработки метода ускоренного определения оптимальных режимов резания в производственных условиях было предложено применить тепловизионный метод измерения температур в зоне резания. Измерение температуры тепловизором имеет ряд преимуществ перед перечисленными способами.

1. Тепловизор позволяет получить термограммы, по которым можно определить распределение температур в заданной области, а также позволяет определить в зоне наблюдения самый нагретый участок и измерить его температуру с достаточной точностью. Например, погрешность измерения может составлять не более $\pm 2^\circ\text{C}$.

2. Применение тепловизора не накладывает ограничений на конструкцию режущего инструмента, приспособлений и станка.

Применение тепловизора для измерения температуры в зоне резания в то же время имеют ряд ограничений.

1. На результат измерения оказывает влияние излучательная способность измеряемого объекта. Коэффициент излучения может колебаться от 0,02 до 0,98, то есть изменяться в 50 раз [1], [2], его величина зависит: от материала объекта; от температуры нагретого участка; от цвета и состояния поверхности объекта, например, внешняя поверхность стружки более шероховатая и излучает больше тепла, чем гладкая внутренняя поверхность. По результатам наших измерений коэффициент излучения внешней поверхности титановой стружки (шероховатая поверхность) равен 0,6, а внутренней, прилегающей к резцу (более гладкая поверхность), – 0,2..0,35.

2. Зона резания в процессе обработки закрыта стружкой, и судить о температуре передней поверхности резца можно только по внешней поверхности стружки. Результаты измерения температуры в зоне резания будут занижены из-за наличия значительных градиентов температуры.

Для устранения указанных ограничений при измерении температуры тепловизионным методом был выбран тепловизор модели BALTECH TR-01500, позволяющий постоянно вести съемку объектов с частотой кадров 50 Гц с одновременной фиксацией температурного поля и измерением максимальной температуры объекта. Диапазон измерений тепловизора составляет от -20°C до 1800°C , погрешность измерений $\pm 2^\circ\text{C}$. Тепловизор позволяет проводить корректировку

коэффициентов излучения от 0,01...1,0 и запоминает их значения, а также выводит на экран зоны, изображающие температурное поле с учетом различных коэффициентов излучения.

Таким образом, появляется возможность измерять температуру стружки в момент ее формирования с предварительно определенным коэффициентом излучения внешней поверхности стружки, а в момент выхода резца из зоны резания и освобождения его передней поверхности от стружки определять максимальную температуру передней поверхности резца со своим коэффициентом излучения соответствующим этой поверхности.

Была создана экспериментальная установка на базе универсального токарного станка модели 16Б16КА.

На станке устанавливалось кольцо $\varnothing 135$ мм из титанового сплава BT1-0 с проточенными канавками для выхода резца из зоны резания. Длина участков обработки определялась по времени выхода процесса резания на стационарный тепловой режим, который определялся по наружной поверхности стружки в зоне ее формирования.

Рис. 1 Момент выхода резца из зоны резания

На рисунке 1 хорошо видна температура передней поверхности резца в момент его выхода из зоны резания $512,6^{\circ}\text{C}$.

После обработки всей термограммы был получен график, представленный на рис. 2.

После проведения серии опытов было установлено, что температура как поверхности стружки так и передней поверхности резца с ростом износа инструмента увеличивается на $5...8^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Скорость остывания передней поверхности резца в начальный период времени зависит от размеров державки и вылета резца и в среднем составляла $\xi=300^{\circ}\text{C}/\text{сек}$.

Рис. 2. Изменение температуры на внешней поверхности стружки и передней поверхности резца в момент выхода его из металла.

Основными составляющими погрешности измерения тепловизором передней поверхности резца являлись:

1. Рассеивание результатов измерения температуры тепловизором (паспортные данные), $a = 4^\circ\text{C}$. Предполагается, что рассеяние показаний тепловизора подчиняется закону равной вероятности. Среднеквадратическая оценка погрешности измерения тепловизором [5] в этом случае составляет:

$$\sigma_T = \sqrt{\int_{-0,5}^{0,5} (ax)^2 dx} = 1,155^\circ\text{C}.$$

2. Погрешность определения коэффициентов излучения состоит из среднеквадратической оценки погрешности измерения тепловизором и среднеквадратической оценки погрешности измерения температуры резца в муфельной печи образцовыми термopарами, $\sigma_{\text{ТП}} = 0,289^\circ\text{C}$. Среднеквадратическая оценка коэффициента излучения:

$$\sigma_{\text{и}} = \sqrt{\sigma_{\text{ТП}}^2 + \sigma_T^2} = \sqrt{0,289^2 + 1,155^2} = 1,191^\circ\text{C}.$$

3. Погрешность из-за дискретности при съёмке процесса с частотой $f = 50$ кадров в секунду. Среднеквадратическая погрешность, возникающая при фиксации момента выхода резца из зоны резания, составляла [4]:

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-0,5}^{0,5} (bx)^2 dx} = 1,732^\circ\text{C}$$

где b – дискретность отсчета температуры в момент выхода резца из зоны резания:

$$b = \frac{\xi}{f} = \frac{300}{50} = 6^\circ\text{C/кадр}$$

Суммарная среднеквадратическая погрешность измерения:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{\text{и}}^2 + \sigma_x^2} = \sqrt{1,155^2 + 1,191^2 + 1,732^2} = 2,40^\circ\text{C}$$

Выводы

1. Ни один из ранее существовавших способов измерения температуры в зоне резания не дает возможности с достаточной точностью определить температуру в зоне резания в производственных условиях.

2. Доказана возможность применения тепловизионного метода измерения температуры в зоне резания.

3. Предлагаемый метод измерения температуры с применением современного тепловизора, позволяет достаточно точно определить температуру в зоне резания в момент схода стружки без существенных изменений конструкции резцов, приспособлений и станка, что важно в условиях производства.

4. Градиент температуры по толщине стружки для принятых режимов обработки составляет $2,5 \dots 3^\circ\text{C/мкм}$.

5. Скорость остывания передней поверхности резца в начальный период составляла в среднем 300°C/сек .

1. [Sutter G., Faure L., Molinari A. и др. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining//Int. J. of Machine tools & Manufacture. -2003. Vol. 43, с. 671 - 678.]
2. Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder / R. Carvalho, S.M.M. Lima e Silva, A.R. Machado, G/ Guimaraes // J/ of Mat. Proc. Techn.-2006.- 179.-P/ 97-104.
3. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение. 1976.–278 с.
4. Криворучко Д.В., Залого В.А., Мазур Н.П. Анализ современных методов численного моделирования тепловых явлений при резании материалов// Сучасні технології у машинобудуванні: збірник наукових праць. -Х.: НТУ «ХПІ», 2007, Т. 3, с. 158 - 167.
5. Дж. Бендат, А. Пирсол Измерение и анализ случайных процессов. М.: изд. «Мир», 1971. –408 с.