

Сведения об авторах

Балина Ольга Владимировна, к. т. н., доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: balinaov@tyuiu.ru

Нассонов Валерий Викторович, к. т. н., доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: nassonovvv@tyuiu.ru

Плеханов Владимир Иванович, к. т. н., доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: plehanovvi@tyuiu.ru

Information about the authors

Balina O. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Material Science and Structural Materials Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: balinaov@tyuiu.ru

Nassonov V. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Material Science and Structural Materials Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: nassonovvv@tyuiu.ru

Plehanov V. I., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Material Science and Structural Materials Technology, Industrial University of Tyumen, e-mail: plehanovvi@tyuiu.ru

DOI: 10/31660.0445-0108-2018-6-113-118

УДК 621

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ЗАГОТОВКА — РЕЖУЩАЯ ПЛАСТИНА — ДЕРЖАВКА» МЕТОДОМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

В. П. Кузнецов¹, Ю. К. Шлык², Р. Ю. Некрасов², В. В. Агеев²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

²Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход электро- тепло аналогии для анализа тепловых процессов. Данный подход, очевидно, оправдан, поскольку он базируется на глубокой физической аналогии процессов распространения тепла и электрического тока в различных средах.

Цель работы — анализ распределения тепловых потоков в системе «заготовка — режущая пластина — державка» (З–РП–Д) с учетом внешнего и внутреннего охлаждения.

Представлена совокупность параметров системы (З–РП–Д), которая дает основание рассматривать их в качестве элементов блок-схемы системы управления термодинамическим режимом токарной обработки материалов любых физико-механических свойств, что является предметом самостоятельных исследований.

Ключевые слова: теплопроводность; теплоемкость; деформации; напряжение; токарная обработка; термодинамический режим

MODELING OF THERMAL PROCESSES IN THE «WORKPIECE — CUTTING INSERT— TOOL HOLDER» SYSTEM BY THERMOELECTRIC ANALOGIES METHOD

V. P. Kuznetsov¹, Yu. K. Shlyk², R. Yu. Nekrasov², V. V. Ageev²

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. The approach of electrothermo analogy for the analysis of thermal processes is considered. This approach is obviously justified, since it is based on a deep physical analogy of the processes of heat propagation and electric current in various media.

The study aims to analyze the distribution of heat fluxes in the system «workpiece — cutting insert — tool holder» (W–CI–TH), taking into account external and internal cooling.

We present the set of parameters of the system (W–CI–TH), which gives grounds to consider them as elements of the block diagram of the control system for the thermodynamic mode of turning materials of any physical and mechanical properties, which is the subject of independent researches.

Key words: thermal conductivity; heat capacity; deformation; voltage; lathe machining; thermodynamic mode

Введение

Одной из важнейших проблем современного машиностроения является контроль процесса регулирования температуры в зоне контакта резца и детали. Чрезмерный рост температуры ускоряет износ режущего инструмента, уменьшает точность обработки и качество поверхности самой детали. Таким образом, управление температурой резания путем реализации тех или иных систем теплоотведения приобретает особую актуальность.

Объект и методы исследования

«Сухая» механическая обработка детали имеет ряд преимуществ, в числе которых такие как низкая себестоимость процесса резания и отсутствие факторов, влияющих на окружающую среду. Однако возрастающие темпы производства в машиностроительной сфере предполагают иные подходы.

Использование дополнительных способов внешнего охлаждения, таких как применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), обеспечивавшей существенное повышение интенсивности теплоотвода из контактной зоны резания, было безусловно прогрессивным решением.

Дальнейшие исследования в этом направлении были посвящены в основном поиску физико-химических и смазывающих свойств различного рода охлаждающих сред, включая и такие специфические, как сжиженные газы (CO_2 и N_2).

При всем многообразии современных методов и средств внешнего охлаждения становится очевидным, что ресурсы повышения эффективности обработки деталей в этом направлении почти исчерпаны. Более того, все используемые системы внешнего охлаждения имеют, по нашему мнению, два существенных недостатка.

Будучи «разомкнутыми» системами [1], они не способны осуществить строгий контроль расхода охлаждающего агента, его последующую очистку и рекультивацию. Системы, в которых отсутствует обратная связь, не позволяют задать оптимальный режим расхода, который позволил бы обеспечить рост технико-экономических показателей процесса резания.

Не менее значимой проблемой таких систем охлаждения и смазки является экологическая проблема. неизбежное выделение в окружающую среду газообразных продуктов горения из зоны контакта заготовки и режущей пластины — само по себе негативный фактор. Более того, продукты горения могут иметь в своем составе токсические компоненты, длительное вдыхание которых способно привести к возникновению и развитию различного рода заболеваний инженерно-технического персонала предприятия.

Решение названных выше проблем может быть достигнуто использованием «замкнутых» систем (СОЖ) [1].

Такой альтернативный подход был предложен В. М. Поповым [2]. По результатам его исследований был изготовлен инструмент, имеющий систему каналов для подвода и отвода охлаждающей жидкости, а также канал для ее контакта с опорной поверхностью сменной режущей пластины.

При безусловной прогрессивности такого метода охлаждения системы (СОЖ) это не обеспечивает смазку трущихся поверхностей режущей пластины и заготовки. В этой связи отказ от традиционного метода внешнего охлаждения представляется мало обоснованным, тем более что он постоянно совершенствуется. А вот совокупность использования обеих систем охлаждения может существенно повысить стойкость инструментального материала режущей пластины.

Отмеченная выше принципиальная возможность использования методов теории управления применительно к «замкнутой» системе охлаждения предполагает создание математической модели терморегулирования процессом резания.

Решение задач, связанных с распространением тепла в различных средах, осуществляется с использованием уравнений параболического типа при заданных граничных условиях [3].

Однако в случае, когда исследуемая термодинамическая модель является много-контактной, то есть содержит поверхности сопряжения сред с различными характеристиками теплопроводности и теплоемкости, задача по ее расчету усложняется. Эту сложность можно преодолеть, если воспользоваться методом электрических аналогий.

Впервые данный подход был использован Г. Ольсоном (1943) применительно к динамическим системам и является на сегодняшний день общепризнанным [4].

Позднее (1965) А. Эйнштейн и Л. Инфельд отметили возможность использования метода электро моделирования для анализа тепловых процессов [5]. Такой подход оправдан, поскольку он базируется на глубокой физической аналогии процессов распространения тепла и электрического тока в различных средах. Дальнейшие исследования в данном направлении подтвердили обоснованность предложенной концепции [6–23].

Преимущество метода моделирования процессов в различного рода технических системах с помощью эквивалентных электрических схем-аналогов очевидно. Теория электрических цепей является сегодня наиболее совершенной [9]. Она обладает широким арсеналом методов расчета как линейных, так и нелинейных цепей. Более того, теория позволяет рассчитать режим работы электрической цепи как в установившемся (стационарном), так и переходном (неустановившемся) режимах с одновременным использованием современных компьютерных инструментов анализа и обработки информации.

Учитывая вышеизложенное, поставим задачу составить термоэлектрическую схему — аналог системы «заготовка — режущая пластина — державка» (З–РП–Д).

На рисунке 1 представлена механическая модель системы (З–РП–Д) с учетом внутреннего и внешнего охлаждения и смазки.

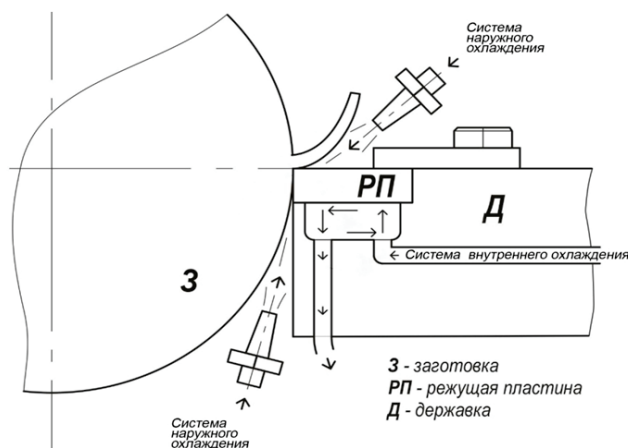


Рис. 1. Механическая модель системы (З–РП–Д)

Проанализируем картину распределенного теплового потока в данной системе.

Очевидно, что основным источником тепла будет место контакта заготовки (З) и режущей пластины (РП). С одной стороны тепло будет распространяться по заготовке и передаваться шпинделю токарного станка, а с другой — державке, также соединительной с его станиной.

Теперь детально рассмотрим зону контакта З и РП в процессе обработки с позиции формирования основного теплового потока. Можно выделить три самостоятельные компоненты этого контакта: трение срезаемого слоя о переднюю грань РП, трение задней грани РП о заготовку; сдвиговые деформации, обусловленные взаимодействием З и РП. В совокупности все эти составляющие и формируют интегральный тепловой поток из зоны контакта заготовки и резца.

Однако весовой фактор каждого из перечисленных выше источников тепла различен. Так, по данным [10, 11], роль первой компоненты может достигать 80 % в общей картине теплового режима процесса резания.

Корректность любой теоретической модели реального объекта исследования тем выше, чем больше параметров этого объекта она учитывает.

Приняв режим обработки заготовки стационарным (постоянство частоты вращения шпинделя и темп подачи резца), можно утверждать, что эквивалентная электрическая схема-аналог должна соответствовать цепи постоянного тока.

Результаты

Руководствуясь аналогиями «электрический ток — тепловой поток», «электропроводность — теплопроводность», «электрический потенциал — температура в зоне контакта», составим электрическую схему-аналог механической системы (З–РП–Д), которая представлена на рисунке 2.

$I_k^{(1)}$ — источник тока, как эквивалент источника тепла от трения передней грани (РП) о стружку; $I_k^{(2)}$ — источник тока, как эквивалент источника тепла от трения задней грани РП о заготовку; $I_k^{(3)}$ — источник тока, как эквивалент источника тепла от сдвиговых деформаций в процессе взаимодействия З и РП; на основании первого закона Кирхгофа: $I_k^{(0)} = I_k^{(1)} + I_k^{(2)} + I_k^{(3)}$ — ток интегрального источника тока, как эквивалент основного источника тепла из зоны контакта резца и заготовки; R_1 и R_2 — сопротивления, являющиеся эквивалентами теплопроводностей режущей пластины (РП) и державки (Д) соответственно, которые в первом приближении мы будем считать линейными.

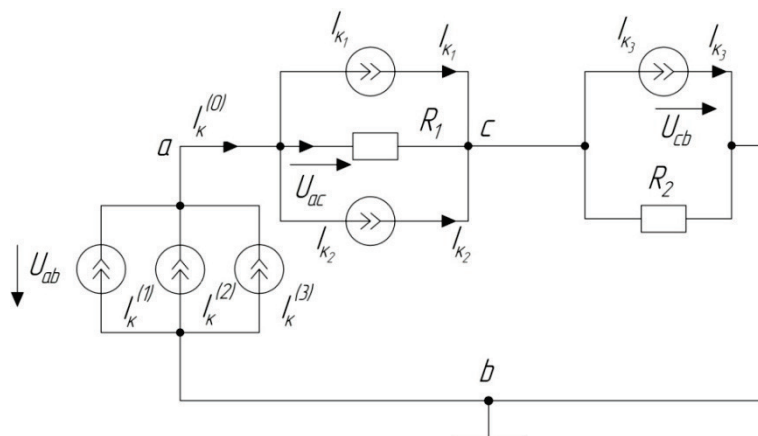


Рис. 2. Термoeлектрическая схема-аналог системы (З–РП–Д) с учетом внутреннего и внешнего охлаждения

Обсуждение

Выбор источников тока, а не источников электродвижущей силы, питающих электрическую цепь-аналог, обусловлен тем обстоятельством, что ток источника тока $I_k^{(0)}$ остается неизменным при любых изменениях параметров электрической цепи [9]. При этом напряжение, которое формируется на его зажимах, является величиной переменной. В условиях принятых выше аналогий изменения напряжения на зажимах интегрального источника тока будут соответствовать всем возможным вариациям температуры в зоне контакта 3 и РП.

Оценим роль заземления узла «b» (см. рис. 2) в схеме-аналоге.

Теория электрических цепей позволяет заземлить любой ее узел или точку. Это не меняет режим работы самой цепи, так как токи в ветвях определяются не абсолютными значениями потенциалов, а их разностью.

С позиции термоэлектрических аналогий это означает следующее. Температура станины токарного станка и связанных с ним шпинделя с заготовкой с одной стороны и державки — с другой приравниваются к некоторому условному 0°C . Тогда температура в зоне контакта 3 и РП, за минусом температуры станины, будет эквивалента потенциалу узла «a» в схеме-аналоге (см. рис. 2).

Данный подход усиливается еще и тем обстоятельством, что стружка, как одни из наиболее нагретых объектов обработки 3, постоянно от нее отделяется, выполняя дополнительное охлаждение режущей пластины.

Теперь перейдем к анализу режима обработки электрической цепи-аналога.

В ее составе присутствуют три дополнительных источника тока: I_{k1} , I_{k2} и I_{k3} , как аналогов систем внешнего и внутреннего охлаждения.

Основополагающим является способ включения данных источников. Их токи направлены встречно базовому току $I_k^{(0)}$ на каждом из R_1 и R_2 цепей.

На основании второго закона Кирхгофа имеем

$$U_{ав} = U_{ac} + U_{св} = (I_k^{(0)} - I_{k1} - I_{k2})R_1 + (I_k^{(0)} - I_{k3})R_2.$$

Анализируя представленный алгоритм решения, можно сделать вывод о том, что напряжение $U_{ав}$, как аналог температуры в зоне контакта РП и 3, является функцией следующих параметров:

- теплопроводности режущей пластины;
- теплопроводности державки;
- расхода жидкости внешнего контура охлаждения;
- расхода жидкости внутреннего контура охлаждения;
- технологического режима обработки заготовки (частоты вращения детали, ее геометрических размеров и темпа подачи режущего инструмента).

Выводы

Совокупность всех перечисленных параметров системы (3–РП–Д) дает основание рассматривать их в качестве элементов блок-схемы перспективной системы управления термодинамическим режимом обработки заготовок любых физико-механических свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Договор № 02.G25.31.0148 с ОАО «Свердловский инструментальный завод») в рамках НИОКТР №Н979.210.007/15 от 28 июля 2015 года для ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет».

Библиографический список

1. Бабаков Н. А., Воронов А. А., Воронова А. А. Теория автоматического управления: Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.

2. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
4. Olson G. Dynamical analogies. – New York (USA), D. Van Nostrand Co, 1943. – 192 p.
5. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Развитие теории от первоначальных понятий до теории относительности и квант / Пер. с англ. С. Г. Суворова. – Москва — Ленинград: Гостехиздат, 1948. – 272 с.
6. Коган И. Ш. Физические аналогии — не аналогии, а закон природы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7438.html> (дата обращения: 03.09.2018).
7. Кононюк А. Е. Обобщенная теория моделирования. Начала. К.1. Ч.1 К.4. – Освіта України, 2012. – 602 с.
8. Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики: моногр. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
9. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
10. Усачев Я. Г. Явления, происходящие при резании металлов. – Петроград: типография Р. Г. Шредера, 1915. – 45 с.
11. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
12. Спиридонов Ф. Ф., Фирсов А. М., Смирнов В. В. Алгоритмы и методы численного моделирования характеристик теплового состояния систем «Деталь — обрабатывающий инструмент» в процессе механической обработки: моногр. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 92 с.
13. Кулбанов М. С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Ч. 1. Моделирование систем и процессов. – М.: МГТУ ГА, 2004. – 108 с.
14. Волкова В. Н., Горелова Г. В., Козлов В. Н. Моделирование систем и процессов / Под. ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. – М.: Юрайт, 2015. – 449 с.
15. Дядик В. Ф. Теория автоматического управления / Национальный исследовательский Томский политехнический ун-т. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2011. – 196 с.
16. Лазарева Т. Я., Мартеньянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.
17. Проскурjakов Н. А. Моделирование процессов диагностики технологической системы как средство повышения размерной точности при обработке на станках с ЧПУ // СТИН. – 2016. – № 1. – С. 2–5.
18. Тахман С. И. Закономерности процесса изнашивания и основы прогноза износостойкости инструментов из стандартных твердых сплавов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2010. – № 3. – С. 64–72.
19. Шаламов В. Г. Математическое моделирование при резании металлов: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
20. Diagnostics of cut-layer deformation and rational tool loading in numerically controlled lathes / R. Yu. Nekrasov Russian engineering research. – 2014. – Vol. 34, Issue 12. – P. 826–828.
21. Nekrasov R. Yu., Putilova U. S., Soloviev I. V. Laser interferometry method of stress determination in loaded cutting tool parts // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 537–541.
22. Nekrasov R. Yu., Starikov A. I., Lasukov A. A. Entering the operative correction machining processes CNC // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Issue 91.
23. Nekrasov R. Yu., Starikov A. I., Lasukov A. A. Diagnosis of the computer-controlled milling machine, definition of the working errors and input corrections on the basis of mathematical // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 154.

Сведения об авторах

Кузнецов Виктор Павлович, д. т. н., профессор кафедры термообработки и физики металлов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, e-mail: v.p.kuznetsov@urfu.ru

Шлык Юрий Константинович, д. т. н., доцент, профессор кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: shlykjk@tyuiu.ru

Некрасов Роман Юрьевич, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru

Агеев Владимир Васильевич, к. т. н., доцент кафедры физики, методов контроля и диагностики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: ageevvv@tyuiu.ru

Information about the authors

Kuznetsov V. P., Doctor of Engineering, Professor at the Department of Heat Treatment and Physics of Metals, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, e-mail: v.p.kuznetsov@urfu.ru

Shlyk Yu. K., Doctor of Engineering, Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering, Industrial University of Tyumen, e-mail: shlykjk@tyuiu.ru

Nekrasov R. Yu., Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering, Industrial University of Tyumen, e-mail: nekrasovrj@tyuiu.ru

Ageev V. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Physics, Methods of Control and Diagnostics, Industrial University of Tyumen, e-mail: ageevvv@tyuiu.ru