

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу
«Тепловые процессы в технологических системах»
для студентов специальности
1-36 01 01 «Технология машиностроения» и
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
дневной и заочной форм обучения

В методических указаниях приведено описание современных методов экспериментальных исследований тепловых процессов при резании металлов, а также основные расчётные методики. Даны теоретические сведения об источниках выделения и распределения тепла при резании. Описана методика проведения экспериментов по исследованию влияния режимов резания на температуру резания с помощью естественной термопары, а также методика математической обработки экспериментальных данных. Также рассмотрены алгоритмы расчёта температуры на поверхности биметаллической втулки и избыточной температуры подшипника скольжения при заданных исходных данных. Изложены подробные рекомендации по выполнению лабораторных работ на данную тему, а также требования к содержанию и оформлению отчета. Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» дневной и заочной форм обучения/

Составители: Я.В. Кудрицкий, ст. препод.
В.А. Сокол, ст. препод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОЧЕНИИ

Цель работы:

- 1) ознакомление с методами измерения температуры в зоне резания;
- 2) приобретение навыков определения температуры в зоне резания;
- 3) обработка экспериментальных данных и получение эмпирических зависимостей;
- 4) установление влияния на среднюю контактную температуру в зоне резания скорости, подачи и глубины резания.

Инструменты и принадлежности: токарно-винторезный станок, мультиметр, проводники, заготовка, резец, справочная литература, микрокалькулятор, линейка.

Краткие теоретические сведения

Одним из главных факторов, определяющих характер и результаты процесса резания, является теплота, образующаяся в зоне резания. Законы теплообразования объясняют целый ряд явлений, связанных со стойкостью инструмента и качеством обработанной поверхности. Знание этих законов позволяет правильно и рационально использовать режущий инструмент.

Основными источниками возникновения теплоты при резании металлов являются:

- работа, затрачиваемая на деформации в срезаемом слое и поверхностных слоях детали $A_{\text{деф}}$;
- работа, затрачиваемая на преодоление сил трения по передней и задней поверхностям инструмента $A_{\text{тр.п.п.}}$; $A_{\text{тр.з.п.}}$.

Суммарная работа, затраченная на процесс резания будет равна:

$$A = A_{\text{деф}} + A_{\text{тр.п.п.}} + A_{\text{тр.з.п.}} \quad (1)$$

Общая мощность тепловыделения при резании равна эквивалентной механической работе деформирования материала и работе сил трения на контактных площадках инструмента, т. е.

$$W = P_z \cdot v, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где P_z – главная составляющая силы резания, Н;

v – скорость резания, м/мин.

Установлено, что почти вся механическая работа резания (99,5%) переходит в теплоту. Небольшая часть работы переходит в потенциальную энергию искажённой кристаллической решётки деформированных зёрен металла. Это связано с тем, что стружка и обработанная поверхность в процессе резания претерпевают наклёп. Обычно этими потерями пренебрегают.

Следовательно, общее количество тепла, выделившееся при резании:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{деф}}$, $Q_{\text{тр.п.п.}}$, $Q_{\text{тр.з.п.}}$ – соответственно мощности тепловыделения источников, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования, работы сил трения на передней и задней поверхностях режущего клина.

Если в технологической подсистеме комбинируется несколько видов энергии, кроме основной (механической) работы резания, то формула (3) принимает вид:

$$Q^* = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}} + Q_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{в}}$ – теплота от дополнительных (внешних) источников.

Образовавшаяся в процессе резания теплота Q (или Q^*), распространяясь по технологической подсистеме первого уровня, расходуется на нагревание стружки $Q_{\text{с}}$, инструмента $Q_{\text{ин}}$, детали $Q_{\text{дет}}$ и рассеивается в окружающую среду $Q_{\text{о.ср.}}$ (рисунок 1).

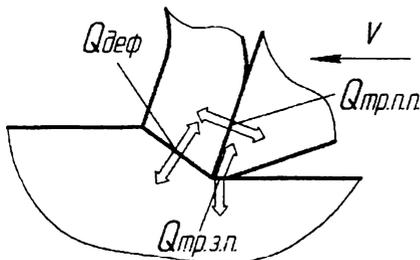


Рисунок 1 – Распределение теплоты в зоне резания

Поэтому уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п.п.}} + Q_{\text{тр.з.п.}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{ин}} + Q_{\text{дет}} + Q_{\text{о.ср.}}, \quad (5)$$

Опытным путём установлено, что $Q_{\text{деф}}$ составляет примерно 55%, $Q_{\text{тр.п.п.}}$ – 35%, $Q_{\text{тр.з.п.}}$ – 10%. При невысоких скоростях резания (30...40 м/мин) $Q_{\text{с}}$ составляет примерно 60...70%, $Q_{\text{дет}}$ – 30...40%, $Q_{\text{ин}}$ – 3%. Если скорость резания значительно повышается, то тепло, образовавшееся в зоне резания, не успевает распространяться в деталь и инструмент, а уносится стружкой. Например, при $v = 400...500$ м/мин $Q_{\text{с}}$ составляет 97...98%, $Q_{\text{ин}}$ – 1%.

На распределение тепла значительно влияет теплопроводность обрабатываемого материала. Например, при обработке титановых сплавов $Q_{\text{ин}} = 10...20\%$.

Степень концентрации теплоты в различных участках изделия, стружки и инструмента различна. Большое количество теплоты концентрируется в определённых зонах, что сильно повышает их температуру. Поэтому различные точки рабочих поверхностей стружки и детали имеют различную температуру, доходящую до нескольких сотен градусов. Образуются температурные поля. Высокая температура изменяет свойства металла и определяет фактическую износостойкость инструментального материала. Температурные деформации детали снижают точность обработки. Поэтому важно знать, какие температуры возникают при различных условиях резания и каков характер их распределения при изменении условий работы.

Зависимости для расчёта температуры резания выводятся двумя путями:

- 1) определяются теоретически на основе теории теплоотдачи;
- 2) находятся по эмпирическим формулам, полученным путём непосредственного измерения температуры при изменении условий резания.

Исследование тепловых процессов в технологических системах тесно связано с проведением экспериментов по измерению температур на различных участках инструмента, заготовки или оборудования, а также с определением мощности и плотности тепловых потоков. Такие эксперименты необходимы, с одной стороны, для решения тех или иных задач опытным путем, а с другой – для проверки правильности и корректирования результатов теоретических построений, предназначенных для определения расчетным путем температур или характеристик источников и стоков теплоты.

При изучении тепловых процессов в технологических системах в процессе эксперимента решают следующие задачи:

- 1) определяют мощность источников тепловыделения, законы распределения плотности тепловых потоков или общее количество теплоты;
- 2) измеряют локальную температуру, т. е. температуру на небольшом участке твердого тела (условно в точке);
- 3) определяют среднюю температуру на поверхности твердого тела, в том числе и на участках, где происходит его соприкосновение с другими телами или жидкостью;
- 4) изучают закон распределения температур на той или иной части поверхности твердого тела, в том числе и на контактных площадках;
- 5) определяют температурное поле внутри твердого тела.

Все методы измерения температуры можно разделить на две большие группы:

- 1) **контактные** – относятся методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. Они могут быть разделены на три группы в соответствии с основными особенностями устройств, с помощью которых их осуществляют: термометры, термопары, термоиндикаторы.
- 2) **бесконтактные** – методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению. Осуществляют либо с помощью устройств, в основе которых лежит регистрация инфракрасного излучения нагретых тел, либо с помощью других устройств, использующих оптические, акустические или пневматические датчики.

Термометры – данный вид приборов предназначен для определения температуры жидкостей, газов и расплавов металлов. **Различают три типовые группы термометров:** 1) жидкостные; 2) манометрические; 3) механические.

В жидкостных термометрах в качестве рабочих сред применяются ртуть, вода, спиртовые растворы, которые изменяют свой объем в зависимости от температуры. Преимущества: а) простота; б) низкая стоимость. Недостатки: а) небольшие диапазоны измерений; б) позволяют измерить локальную температуру в месте их установки, поскольку шкала находится на самом приборе.

В манометрических термометрах используется специальный резервуар с жидкостью или газом, который изменяет свой объем в зависимости от температуры. Изменение объема резервуара регистрируется индикаторной стрелкой через передаточный механизм. Преимущества: а) можно поместить измерительную шкалу на значительном расстоянии от термоприёмника. Недостатки: а) небольшие диапазоны измерений; б) повышение сложности и стоимости прибора.

В механических термометрах используется специальный биметаллический элемент в виде пластины, состоящий из двух одинаковых по толщине металлов с сильно отличающимися термическими коэффициентами линейного расширения. Изменение температуры вызывает термическую деформацию пластины, которая регистрируется чувствительным механизмом прибора. Преимущества: а) развивают значительные механические усилия в процессе измерения, поэтому могут быть включены в систему управления оборудованием. Недостатки: а) повышение сложности и стоимости прибора; б) относительно небольшие диапазоны измерений.

Термопары – в основе их действия используется явление, которое состоит в том, что в замкнутой цепи из двух разнородных металлических проводников А и В (рисунок 2, а) температура спаев которых поддерживается различной (Θ_1 и Θ_2), возникает электрический ток. Электродвижущую силу в такой цепи называют термоэлектродвижущей силой или сокращенно термо ЭДС.

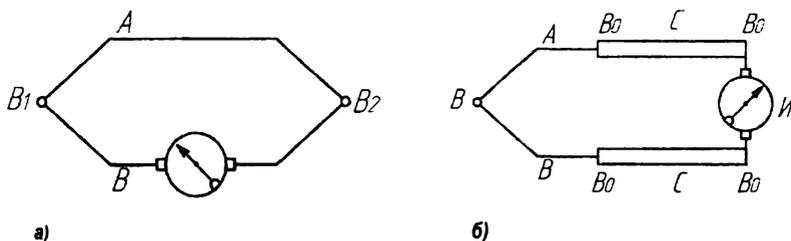


Рисунок 2 – Замкнутая цепь, состоящая из: а) двух разнородных металлических проводников; б) из трёх проводников

Существуют следующие эмпирические законы для термоэлектрических цепей:

1) в замкнутой цепи, состоящей из одного проводника, термо ЭДС не генерируется даже при наличии перепада температур. Следовательно, термо ЭДС в цепи термопары не зависит от распределения температур вдоль проводников, а зависит только от температуры спаев. С данным законом связано применение наиболее распространённой схемы измерения, при которой температура Θ_0 свободных концов проводников А и В поддерживается одинаковой и постоянной, а спай АВ находится при измеряемой температуре Θ . При этом сигнал термопары является только функцией измеряемой температуры;

2) алгебраическая сумма термо ЭДС в цепи, состоящей из любого числа проводников из различных металлов, равна нулю, если вся цепь находится при одной температуре. Из этого следует, что при введении в контур, содержащий два разнородных проводника А и В (рисунок 2, б) с температурами спаев Θ и Θ_0 третьего проводника С, находящегося при одинаковой по всей длине температуре Θ_0 ЭДС термопары не меняется. Следовательно, в цепь термопары можно вводить измерительный прибор или дополнительные удлиняющие провода С, если их температура сохраняется постоянной.

Для изготовления термопар можно использовать любые пары разнородных металлов, удовлетворяющих следующим требованиям:

1) термо ЭДС сплава должна быть достаточно большой, для того чтобы её можно было измерять с нужной точностью; она должна быть непрерывной и линейной функцией температуры;

2) температура плавления или размягчения сплава должна быть выше, чем измеряемая температура поверхности;

3) термоэлектродные сплавы должны быть коррозионно-стойкими;

4) эти материалы должны сохранять свои свойства неизменными в процессе эксплуатации и градуировки, а также быть достаточно прочными и пластичными;

Перечисленным свойствам в той или иной степени удовлетворяют следующие пары сплавов: медь-константан, медь-копель, железо-константан, хромель-копель, хромель-константан, хромель-алюмель. Пределы измерения от 0 до 1000°С.

В технологических экспериментах применяют три вида термопар: искусственные, полусинтетические и естественные термопары.

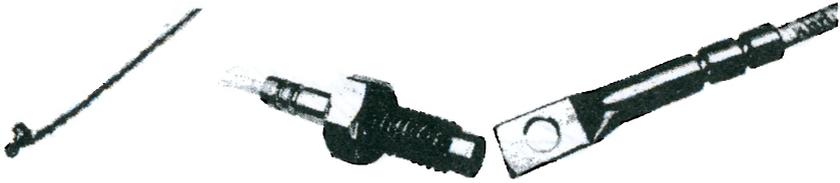
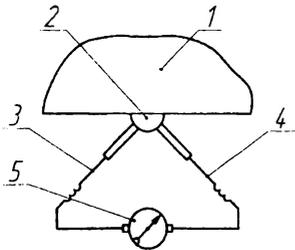


Рисунок 3 – Искусственные термопары различных исполнений

Искусственные термопары применяются для измерения температуры в отдельных точках компонентов технологических систем. Разновидностями искусственных термопар являются прижимные, закладные, перерезаемые, скользящие.

С помощью прижимных (привариваемых) термопар (рисунок 4), спай которых надёжно прикреплён к поверхности твёрдого тела, например, внутри режущего лезвия, измеряют температуру малого участка нагретой поверхности. Диаметр пятна контакта между спаем термопары и твёрдым телом невелик. Это позволяет в первом приближении результатом измерения считать локальную температуру в точке.



1 – компонент технологической системы; 2 – спай;
3 – проводник А; 4 – проводник В; 5 – электроприбор

Рисунок 4 – Схема прижимной искусственной термопары

Закладные искусственные термопары также применяются для измерения локальной температуры малой области (одной точки) внутри твёрдого тела (рисунок 5). Использование закладных термопар обычно связано с изготовлением разрезных образцов.

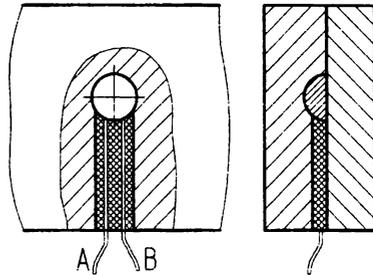


Рисунок 5 – Схема закладной искусственной термопары

Части образца тщательно подгоняют друг к другу по поверхности разъёма. Термопара состоит из двух проводников А и В, покрытых тонким слоем изоляции (лак, эмаль). В одной из половинок образца выработывают углубления для проводников и для спая термопары. Термопару укладывают в углубления, и обе половины плотно сжимают. Углубление под термопару делают глубиной немного меньше, чем диаметр спая, поэтому при сжатии половин гарантируется плотный контакт термопары и твёрдого тела. Закладные термопары могут быть в виде плёнок, напылённых на поверхность разъёма образца. Последовательно напыляются слои: диэлектрик, первый металл, диэлектрик, второй металл, диэлектрик.

Разновидностью искусственных термопар являются перерезаемые (бегущие) и скользящие термопары (рисунок 6). Перерезаемые термопары можно использовать для непосредственной записи законов распределения температур на поверхностях инструмента, контактирующих со стружкой и поверхностью резания. Скользящими термопарами измеряют температуру на контактной стороне стружки.

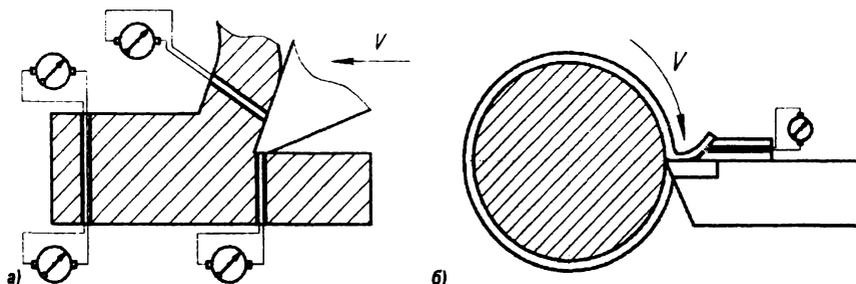


Рисунок 6 – Схема перерезаемой (а) и скользящей (б) термопар

Преимущества: при использовании стандартных проводников зависимость термоЭДС от температуры можно узнать из справочных таблиц.

Недостатки: необходимо разрушать объект исследования для установки термопары, а также возможность измерения только локальных температур.

В полуприродных термопарах одним из электродов является компонент технологической системы (заготовка или инструмент), а вторым – другой металл (рисунок 7). Могут быть прижимные (приваренные), перерезаемые и закладные.

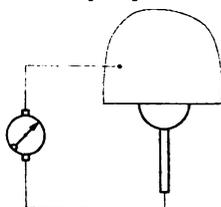
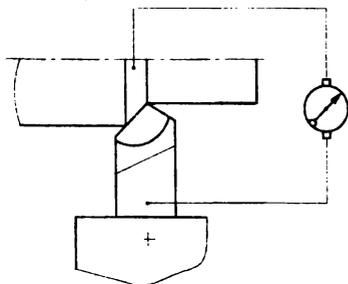


Рисунок 7 – Схема прижимной полуприродной термопары

Преимущества: 1) конструкция полуприродной термопары проще, чем искусственной;

2) место спая полуприродной термопары с объектом измерения имеет меньший диаметр, что позволяет точнее определить локальное значение температуры.

Недостатки: обязательное тарирование каждый раз при измерении температуры в разных материалах.



Естественные термопары часто используются в технологических экспериментах. В естественных термопарах оба проводника являются компонентами технологической системы (рисунок 8).

Рисунок 8 – Схема естественной термопары

Преимущества: 1) простота конструкции и низкая стоимость;

2) температура которых измеряют, нет необходимости разрушать для установки проводников или заменять моделиями;

3) измерение можно выполнять непрерывно в процессе обработки заготовки, эксплуатации инструмента или функционирования детали машины.

Недостатки: 1) сложно получить плотный и надёжный контакт между телами, образующими термопару, чтобы его можно было считать спаем (за исключением случая резец-деталь при механической обработке);

2) оба тела обязательно должны быть электропроводными (а во многих случаях производится обработка диэлектриков или обработка металлов керамическими материалами);

3) естественной термопарой нельзя измерять температуру свободной поверхности;

4) возникают существенные трудности при тарировании естественной термопары, поскольку при этом желательно создавать условия контакта между компонентами термопары идентичные или близкие к тем, которые будут иметь место при проведении эксперимента;

5) возникают трудности при замыкании термоэлектрической цепи, когда компоненты естественной термопары подвижны.

Тарирование термопары заключается в том, что определяется соответствие значений температуры показаниям вольтметра, включенного в цепь термопары.

Для этого помещают спай термопары в среду, температура которой известна, и фиксируют показания милливольтметра, соответствующие разным температурам. Затем строится тарировочный график, по которому расшифровываются показания милливольтметра термопары после проведения опытов. Температура холодных концов при тарировке должна быть такой же, как в процессе работы.

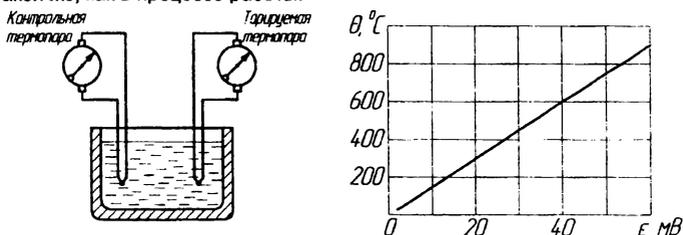


Рисунок 9 – Схема тарирования термопары и тарировочный график

Термоиндикаторы – это вещества, реагирующие на изменение температуры. **Различают 4 типовые группы термоиндикаторов:**

1) **химические термоиндикаторы** – изменяют свой цвет при нагреве до определённой температуры в связи с химическим взаимодействием веществ, входящих в их состав. Выпускаются химические термоиндикаторы в виде красок, лаков, карандашей.

Преимущества химических термоиндикаторов: высокая наглядность; возможность видеть законы распределения температур на больших поверхностях; широкий диапазон измеряемых температур; низкая погрешность измерения;

2) **термоиндикаторы плавления** – это тонкие плёнки чистых металлов, 3-5 мкм, температура плавления которых известна. Металлы напыляют на исследуемую поверхность в порядке, начиная с самого тугоплавкого;

3) **жидкокристаллические термоиндикаторы** – это вещества, которые резко переходят из жидкого в кристаллическое состояние при изменении температуры в малом интервале и при этом изменяют свой цвет. Таких переходов может быть один или несколько, а изменение цвета может быть обратимым или необратимым;

4) **люминесцентные термоиндикаторы** – это вещества, изменяющие яркость свечения или световую гамму при изменении температуры в малом интервале.

Общие преимущества всех термоиндикаторов: 1) не требуют каких-либо дополнительных приборов; 2) результаты измерений не зависят от электромагнитных полей; 3) позволяют увидеть температурные поля на больших поверхностях; 4) малая толщина, что позволяет сохранить теплофизические параметры изучаемого объекта практически без изменений.

Недостатки: 1) показывают только предельные температуры; невозможно использовать внутри объектов; 3) измерения можно видеть непосредственно на объекте.

Тепловизоры (рисунок 10) позволяют наблюдать температурное поле на поверхности тела. Тепловое изображение объекта проецируется на экран. При этом различные температуры отображаются различными цветами. Калибровка прибора позволяет оценить температуры, которым соответствует тот или иной цвет поля, наблюдаемого на экране.

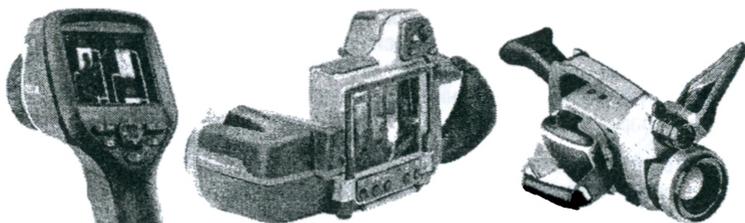
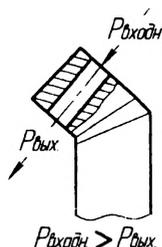


Рисунок 10 – Тепловизоры различных исполнений

Оптический метод – реализуется с помощью специальных приборов, в электрической цепи которых есть фотосопротивление. Для измерения температуры объектив прибора фокусируется на определённый участок поверхности детали или инструмента. В зависимости от теплового излучения исследуемого объекта, фотосопротивление изменяет силу тока в электрической цепи прибора, что регистрируется и отображается на индикаторном табло или шкале. Для реализации данного метода при резании используются специальные светопроводящие алмазные резцы.

Акустический метод – в основе метода лежит закономерность изменения длины звуковой волны в зависимости от температуры. Для регистрации изменения длины звуковой волны используются специальные приборы.



Пневматический метод – основан на изменении динамической вязкости воздуха в зависимости от температуры. Пример реализации метода показан на рисунке 7. В режущей части инструмента выполняется отверстие. С одной стороны в отверстие подаётся воздух под определённым давлением. При изменении температуры на стенках отверстия изменяется вязкость воздуха и возникает перепад давления воздуха на выходе из отверстия (рисунок 11).

Рисунок 11 – Схема реализации пневматического метода

Преимущества оптического, акустического и пневматического методов: 1) большой диапазон измеряемых температур; 2) высокая точность измерений.

Недостатки: 1) сложность приборов; 2) их высокая стоимость.

Калориметры применяются для определения количества теплоты, мощности, плотности тепловых потоков и средней температуры. Обычно представляют собой ёмкости с теплоизоляцией, в которые подведен термодатчик или установлен термометр. Например, улавливая в калориметр горячую стружку (рисунок 12), зная массу стружки и воды, а также их теплофизические свойства и изменение температуры воды, можно определить количество тепла, переходящего в стружку и её среднюю температуру.

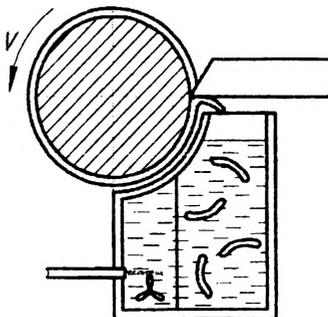
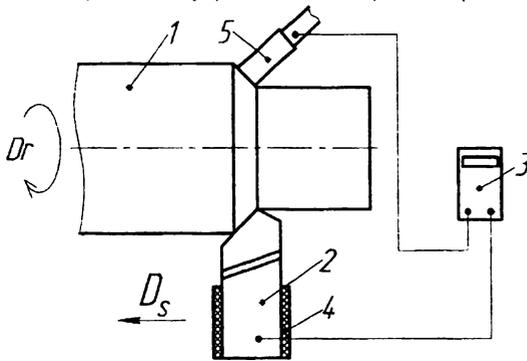


Рисунок 12 – Измерение температуры при помощи калориметра

Преимущества калориметров: 1) простота конструкции; 2) невысокая стоимость. **Недостатки:** 1) позволяют определять только среднюю температуру объекта; 2) не дают описания температурного поля; 3) ограничены в размерах и форме.

Методические указания

Экспериментальная часть лабораторной работы заключается в исследовании влияния глубины, подачи и скорости резания на величину температуры резания. Изучение характера данных зависимостей проводится методом однофакторного планирования эксперимента. При этом осуществляется 3 серии измерений, в каждой из которых переменным является лишь один исследуемый фактор. Схема подключения естественной термопары к измерительному устройству представлена рисунком 13.



1 – заготовка; 2 – резец;
3 – мультиметр; 4 – изолятор;
5 – подвижный контакт
Рисунок 13 – Схема подключения естественной термопары к измерительному устройству

При проведении первой серии экспериментов устанавливается зависимость температуры резания от глубины резания $\Theta = f(t)$ при неизменных величинах подачи и частоте вращения заготовки. Их значения нужно установить на станке и вписать в таблицу 1. Измерение величины термо ЭДС осуществляется при помощи цифрового мультиметра, показания которого для каждого из установленных режимов резания заносится в таблицу 1.

Таблица 1 – Протокол исходных данных, измерений и расчётов

№ п/п	Исследуемая зависимость	Диаметр заготовки	n, мин ⁻¹	Режимы резания			Термо ЭДС, мВ	Θ , °C
				v, м/мин	S, мм/об	t, мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\Theta = f(t)$							
2								
3								
4								
5								
1	$\Theta = f(S)$							
2								
3								
4								
5								
1	$\Theta = f(v)$							
2								
3								
4								
5								

При проведении второй серии экспериментов устанавливается зависимость температуры резания от подачи $\Theta = f(S)$ при неизменных величинах частоты вращения и глубины резания.

При проведении третьей серии экспериментов устанавливается зависимость температуры резания от скорости $\Theta = f(v)$ при неизменной глубине резания и подаче.

После проведения всех измерений необходимо по тарировочному графику (рисунок 14) определить фактические значения температуры резания и результаты занести в таблицу 1.

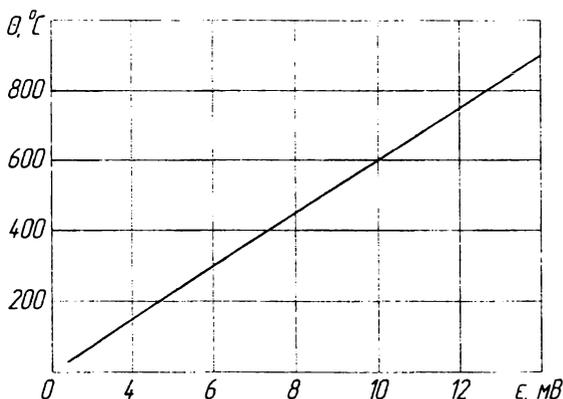


Рисунок 14 – Тарировочный график естественной термопары сталь 45 – твёрдый сплав T15K6

При обработке экспериментальных данных определяется взаимосвязь температуры резания с режимами обработки, которая достаточно точно описывается эмпирической формулой:

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot v^m \cdot s^n \cdot t^p, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

Для получения численных значений постоянного множителя и показателей степени в приведённой формуле необходима математическая обработка экспериментальных данных, которая проводится по следующей методике:

1. По полученным экспериментальным данным строим графики зависимостей температуры резания от режимов обработки в натуральных координатах (рисунок 15)

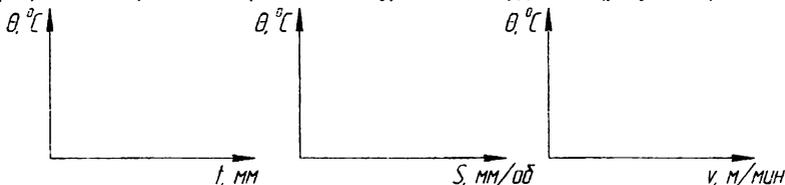


Рисунок 15 – Графики зависимостей температуры резания Θ от глубины t , подачи S и скорости резания v

2. Графоаналитическим методом определяют постоянные множители и показатели степени в эмпирической формуле. Для этого необходимо произвести следующие действия:

– построить в двойной логарифмической системе координат графические зависимости температуры резания от элементов режима резания (рисунок 16).

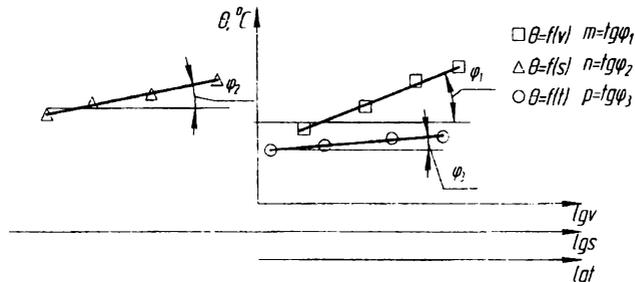


Рисунок 16 – Графики зависимостей температуры резания Θ от глубины t , подачи S и скорости резания v в двойных логарифмических системах координат

!!!Масштабы по горизонтальной и вертикальной оси должны быть одинаковыми.

– величины показателей степени m , n , p определить по графикам через тангенсы углов наклона прямых к горизонтальной оси координат.

3. Величину постоянного множителя определить по опытным данным (см. таблицу 1) и полученным показателям степеней методом средних.

$$C_{\theta} = \frac{\frac{\Theta_1}{v_1^m \cdot s_1^n \cdot t_1^p} + \frac{\Theta_1}{v_2^m \cdot s_2^n \cdot t_2^p} + \dots + \frac{\Theta_1}{v_k^m \cdot s_k^n \cdot t_k^p}}{k}, \quad (7)$$

где k – количество проведённых экспериментов.

4) Записать эмпирическую формулу для расчёта температуры резания с рассчитанными показателями степени и постоянным множителем.

Содержание отчёта

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Перечень оборудования, инструментов и принадлежностей.
3. Краткие теоретические сведения о различных методах измерения температуры.
4. Схема подключения естественной термопары.
5. Протокол исходных данных и результатов измерений.
6. Графики зависимости температуры резания от режимов резания в натуральных системах координат.
7. Графики зависимости температуры резания от режимов резания в двойных логарифмических системах координат.
8. Расчёты показателей степени в эмпирической формуле.
9. Расчёт постоянного множителя в эмпирической формуле.
10. Эмпирическая формула в окончательном виде.

Контрольные вопросы

1. Основные источники теплоты при резании металлов.
2. Каков тепловой баланс при резании металлов?
3. Что подразумевается под термином «температура резания» и от чего она зависит?
4. Термометры, их достоинства и недостатки.
5. Искусственные термопары, их достоинства и недостатки.
6. Полуискусственные термопары, их достоинства и недостатки.
7. Естественные термопары, их достоинства и недостатки.
8. Как проводится тарирование термопары.
9. Термоиндикаторы.
10. Бесконтактные методы измерения температуры, их достоинства и недостатки.
11. Факторы, влияющие на температуру резания при точении.
12. Как влияет на температуру резания скорость резания, чем можно объяснить такой характер влияния?
13. Как влияют на температуру резания подача и глубина резания, чем можно объяснить такой характер их влияния?
14. Как влияют на температуру резания геометрические параметры резца, свойства обрабатываемого материала, смазочно-охлаждающие жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВТУЛКИ ПРИ ИЗВЕСТНОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЕ ВНУТРИ ВТУЛКИ

Цель работы: освоить методику расчёта эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойной цилиндрической втулки, а также коэффициентов теплопроводности углеродистых, хромоникелевых и аустенитных сталей. Выявить факторы, влияющие на величину изменения температуры поверхности втулки.

Инструменты и принадлежности: справочная литература, калькулятор.

Методические указания

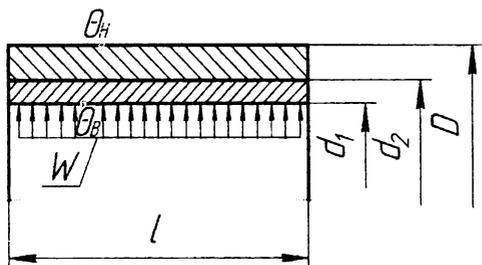


Рисунок 17 – Эскиз биметаллической втулки с указанием основных размеров

1. Определить коэффициенты теплопроводности для каждого слоя с учётом группы стали.

1.1 Для углеродистых сталей коэффициент теплопроводности может быть определён по формуле:

$$\lambda_{\text{ст}} = m_1 - m_2 \cdot \Sigma + m_3 \cdot \Sigma^2, \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)} \quad (8)$$

$$m_i = a_i + b_i \cdot \Theta + c_i \cdot \Theta^2, \quad (9)$$

где a_i, b_i, c_i – коэффициенты, определяемые по справочным таблицам;

Θ – среднее значение температуры рассматриваемого слоя.

Значения коэффициентов для формул (3), (4)

1) для коэффициента m_1 : $a_1 = 76,8$; $b_1 = -6,67 \cdot 10^{-2}$; $c_1 = 0$.

2) для коэффициента m_2 : $a_2 = 34,2$; $b_2 = -9,88 \cdot 10^{-2}$; $c_2 = 8,14 \cdot 10^{-5}$.

3) для коэффициента m_3 : $a_3 = 9,3$; $b_3 = -3,95 \cdot 10^{-2}$; $c_3 = 4,18 \cdot 10^{-5}$.

1.2 Для хромоникелевых и аустенитных сталей с различным суммарным содержанием компонентов коэффициент теплопроводности определяется по формуле:

$$\lambda_{\text{аустен}} = 21,3 - 11,6S + (0,61 + 1,34S) \cdot 10^{-2} \Theta, \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}, \quad (10)$$

где $S = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{A_i}$, M_i – процентное содержание i -го компонента в стали (приложение 1);

A_i – атомный вес i -го компонента, n – количество компонентов (приложение 2).

2. Определить падение температуры при прохождении теплового потока через первый слой по формуле:

$$\Delta\Theta_{\text{пл}} = \frac{W\Delta}{F\lambda}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

При выполнении условия $\Delta_1 / r_{\text{пл}} \leq 0,05$ расчёт втулки можно в первом приближении выполнять по методике как для плоской стенки или по формуле:

$$\Delta\Theta_{\text{вт}} = \frac{W \cdot r_{\text{н}}}{F \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (12)$$

где F – площадь боковой поверхности цилиндра.

Для нахождения площади боковой поверхности цилиндра необходимо выполнить развёртку втулки, представив её в виде плоской двухслойной стенки, толщиной $\Delta = r_{\text{н}} - r_{\text{в}}$. При этом необходимо считать площадь теплопроводящей поверхности плоской стенки равной внутренней цилиндрической поверхности втулки: $F = \pi d l$.

3. Определить коэффициент теплопроводности для второго слоя с учётом падения температуры.

4. По рассчитанным коэффициентам теплопроводности каждого из слоёв определить эквивалентный коэффициент теплопроводности втулки по формуле:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\ln(r_{\text{н}} / r_{\text{в}})}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} |\ln(1 - \varepsilon_i)|}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_i = \Delta_i / r_i$ – безразмерный коэффициент, представляющий собой отношение толщины i -го слоя к радиусу наружной поверхности этого слоя;
 $r_{\text{н}}$ и $r_{\text{в}}$ – соответственно радиусы наружной и внутренней поверхностей втулки.

5. Определить изменение температуры при прохождении теплового потока мощностью W через плоскую двухслойную стенку толщиной Δ и площадью F по формуле:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = \frac{W \cdot \Delta}{F \cdot \lambda_{\text{экв}}}, \quad (14)$$

6. Определить изменение температуры при прохождении теплового потока через биметаллическую втулку, введя коэффициент формы цилиндрической втулки относительно плоской стенки по формуле:

$$\frac{\Theta_{\text{в}} - \Theta_{\text{н}}}{\Theta_1 - \Theta_2} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot |\ln(1 - \varepsilon)|, \quad (15)$$

где $\Theta_{\text{в}} = \Theta_1$ (считаем, что тепловой поток направлен изнутри наружу).

7. Сравнить величины падения температуры при прохождении теплового потока через плоскую стенку и через втулку. Сделать вывод о влиянии различных параметров, используемых при расчёте на изменение температуры поверхности втулки.

Пример решения задачи

Исходные данные:

$d_1 = 0,22$ м; $d_2 = 0,24$ м; $D = 0,4$ м; $l = 0,11$ м; материал 1-го слоя – сталь 40X; материал второго слоя – сталь АС14ХГН; мощность источника $W = 68$ Вт; температура внутри втулки $\Theta = 160$ °С.

1. Определяем коэффициенты теплопроводности для каждого слоя с учётом группы стали.

1.1 Определяем коэффициент теплопроводности для материала первого слоя (сталь 40X) по формуле (8):

Для этого определим значения коэффициентов m_1 , m_2 , m_3 по формуле (9):

$$m_1 = 76,8 - 6,67 \cdot 10^{-2} \cdot 160 + 0 \cdot 160^2 = 66,13$$

$$m_2 = 34,2 - 9,88 \cdot 10^{-2} \cdot 160 + 8,14 \cdot 10^{-5} \cdot 160^2 = 20,48$$

$$m_3 = 9,3 - 3,95 \cdot 10^{-2} \cdot 160 + 4,18 \cdot 10^{-5} \cdot 160^2 = 4,05$$

Химический состав стали 40X:

C – 0,36-0,44%; Si – 0,17-0,37%; Mn – 0,5-0,8%; S – 0,035%; P – 0,035%; Cr – 0,8-1,1 %; Ni – 0,3%; Cu – 0,3%.

Суммарное содержание компонентов:

$$\Sigma = 0,36 + 0,17 + 0,5 + 0,035 + 0,035 + 0,8 + 0,3 + 0,3 = 2,5\%$$

$$\lambda_{\text{ст}} = 66,13 - 20,48 \cdot 2,5 + 4,05 \cdot 2,5^2 = 40,24 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$$

1.2 Определяем коэффициент теплопроводности для материала второго слоя по формуле (10):

Химический состав стали 40X:

C – 0,12%; Si – 0,8-1,1%; Mn – 0,5-0,8%; S – 0,04%; P – 0,035%; Cr – 0,6-0,9 %; Ni – 0,3-0,8%; Cu – 0,4-0,6%.

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{A_i} = \frac{0,12}{12,011} + \frac{0,8}{28,09} + \frac{0,5}{54,94} + \frac{0,04}{32,06} + \frac{0,035}{30,97} + \frac{0,6}{51,996} + \frac{0,3}{58,7} + \frac{0,4}{63,546} = 0,073$$

$$\lambda_{\text{вст}} = 21,3 - 11,6 \cdot 0,073 + (0,61 + 1,34 \cdot 0,073) \cdot 10^{-2} \cdot 160 = 21,59 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$$

2. Определим падение температуры при прохождении через первый слой по формуле (12):

Для этого рассчитаем площадь теплопроводящей поверхности плоской стенки, равной внутренней цилиндрической поверхности втулки:

$$F = 3,14 \cdot 0,22 \cdot 0,11 = 0,076 \text{ м}^2$$

$$\Delta\Theta_{\text{ст}} = \frac{W \cdot r_{\text{н}}}{F \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}\right) = \frac{68 \cdot 0,12}{0,076 \cdot 40,24} \cdot \ln\left(\frac{0,12}{0,11}\right) = -0,23 \text{ }^\circ\text{С}$$

3. Так как падение температуры при прохождении теплового потока через первый слой биметаллической втулки незначительно и им можно пренебречь, то коэффициент теплопроводности для второго слоя с учётом падения температуры определять не будем.

4. По рассчитанным коэффициентам теплопроводности каждого из слоёв определим эквивалентный коэффициент теплопроводности втулки по формуле (13):

Рассчитаем безразмерные коэффициенты ε_1 и ε_2 .

$$\varepsilon_1 = \frac{(0,24 - 0,22)/2}{0,24/2} = 0,083; \quad \varepsilon_2 = \frac{(0,4 - 0,24)/2}{0,4/2} = 0,4;$$

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\ln(0,2/0,11)}{\frac{1}{40,24} |\ln(1 - 0,083)| + \frac{1}{21,59} |\ln(1 - 0,4)|} = 23,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$$

5. Определим изменение температуры при прохождении теплового потока мощностью W через плоскую двухслойную стенку толщиной Δ и площадью F по формуле (14):

$$\Theta_1 - \Theta_2 = \frac{W \cdot \Delta}{F \cdot \lambda_{\text{экв}}} = \frac{68 \cdot 0,09}{0,076 \cdot 23,15} = 3,5 \text{ °C}$$

6. Определим изменение температуры при прохождении теплового потока через биметаллическую втулку, введя коэффициент формы цилиндрической втулки относительно плоской стенки по формуле (15):

$$\varepsilon = 0,09/0,2 = 0,45$$

$$\frac{\Theta_B - \Theta_H}{\Theta_1 - \Theta_2} = \frac{1}{0,45} \cdot |\ln(1 - 0,45)|$$

$$\Theta_B - \Theta_H = (\Theta_1 - \Theta_2) \cdot 1,33$$

$$\Theta_B - \Theta_H = 3,5 \cdot 1,33$$

$$\Theta_H = \Theta_B - 4,7 = 160 - 4,7 = 155,3 \text{ °C}$$

Контрольные вопросы

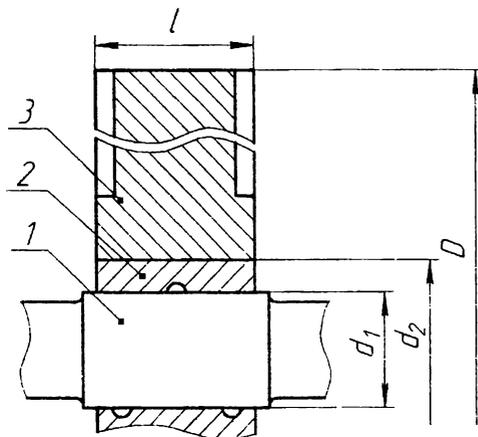
1. Чем отличаются друг от друга трех-, двух- и одномерные температурные поля?
2. Чем отличается квазистационарное температурное поле от стационарного и нестационарного?
3. Как расположены по отношению друг к другу векторы градиента температуры и плотности теплового потока?
4. Каким законом связаны между собой векторы градиента температуры и плотности теплового потока?
5. На внутренней поверхности цилиндрической втулки и на одной из плоскостей пластины, изготовленных из одного и того же материала, поддерживается температура, равная температуре окружающей среды. Противоположные поверхности втулки и пластины нагреваются тепловыми потоками, имеющими одну и ту же плотность. Толщина стенки втулки равна толщине пластины. Где возникает более высокая температура – на наружной поверхности втулки или на поверхности пластины?
6. Объясните физический смысл коэффициентов теплопроводности и температуропроводности материала.
7. Равен ли коэффициент теплопроводности тела с внутренними пустотами коэффициенту теплопроводности материала, из которого изготовлено это тело? Как учесть влияние пустот?
8. Сопоставьте между собой термические сопротивления двух стержней квадратного сечения, изготовленных из одного и того же материала, если стержень № 1 имеет в 2 раза большую длину и в 2 раза большую площадь поперечного сечения, чем стержень № 2. Рассмотрите два варианта: а) тепловой поток направлен через торец вдоль оси стержня; б) тепловой поток направлен через боковую поверхность, перпендикулярно оси стержня.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

РАСЧЁТ ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Цель работы: освоить методику расчёта избыточных температур рабочей поверхности подшипника скольжения, а также установить зависимость изменения температуры узла трения от времени непрерывной работы.

Инструменты и принадлежности: справочная литература, калькулятор.



1 – вал; 2 – подшипник;
3 – корпус
Рисунок 18 – Узел трения подшипника скольжения

Методические указания

1. Определить мощность тепловыделения в подшипнике:

$$W_o = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n, \text{ Вт}, \quad (16)$$

где M – момент трения подшипника, Н·м;
 n – частота вращения, с⁻¹.

2. Рассчитать коэффициент формы для вала:

$$L_v = c \cdot F_c^m, \quad (17)$$

$$F_c = \omega_1 \cdot \tau / d^2, \quad (18)$$

где ω_1 – коэффициент температуропроводности вала, м²/с;
 d – диаметр вала, м.

При $F_c < 0,1$ $c = 4,6$; $m = 0,18$;
При $0,1 \leq F_c \leq 10$ $c = 3,3$; $m = 0,3$;
При $10 < F_c \leq 100$ $c = 2,33$; $m = 0,5$;
При $F_c > 100$ $c = 1,65$; $m = 0,83$;

3. Рассчитать эквивалентный коэффициент теплопроводности втулки и корпуса, не учитывая уменьшение объёма металла корпуса, вызванное наличием выемок у рёбер жёсткости.

$$\lambda_{\text{эKB}} = \frac{\ln(r_{\text{H}}/r_{\text{B}})}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} |\ln(1 - \varepsilon_i)|}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \quad (19)$$

где r_{H} и r_{B} – соответственно радиусы наружной и внутренней поверхностей цилиндра;

$\varepsilon_i = \Delta_i / r_i$ – безразмерный коэффициент, представляющий отношение толщины каждого слоя к радиусу его наружной поверхности.

4. Рассчитать эквивалентный коэффициент температуропроводности:

$$\omega_{\text{эKB}} = \frac{\lambda_{\text{эKB}}}{(c\rho)_{\text{эKB}}}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (20)$$

где $(c\rho)_{\text{эKB}}$ – эквивалентная теплоёмкость системы из нескольких тел;

$$(c\rho)_{\text{эKB}} = \frac{\sum_1^k (c\rho)_i \cdot V_i}{\sum_1^k V_i} = \frac{\sum_1^k \lambda_i \cdot V_i / \omega_i}{\sum_1^k V_i}, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)}, \quad (21)$$

где $(c\rho)_i$ – объёмная теплоёмкость каждого тела, Дж/(м³·°C);

V_i – объём каждого тела, м³.

5. Определяем коэффициент формы втулки с корпусом:

$$L_A = \frac{1}{\varepsilon} \cdot |\ln(1 - \varepsilon)|, \quad (22)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta}{r_{\text{H}}} = \frac{(D - d_1)/2}{D/2}$ – безразмерная величина, представляющая собой отношение толщины стенки втулки к радиусу её наружной поверхности.

6. Рассчитать коэффициент

$$b_i^* = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{эKB}}}{\lambda_i} \cdot \frac{L_{\text{B}_i}}{L_A} \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_{\text{эKB}}}}\right)^{-1}, \quad (23)$$

7. Рассчитать коэффициент А:

$$A = \frac{\pi^{3/2}}{2} \cdot \frac{\lambda_i}{\sqrt{\omega_1}} \cdot \frac{d_1 \cdot l}{b_i^* \cdot L_{\text{B}_i}}, \quad (24)$$

8. Рассчитать коэффициент В:

$$B = W_o \cdot p + (c\rho)_c \cdot Q, \quad (25)$$

где $p = 0,01$ – коэффициент;

$Q = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ – расход масла, которое прокачивается через подшипник;

$(c\rho)_c$ – объёмная теплоёмкость масла И-20.

9. Рассчитать избыточную температуру опоры по формуле:

$$\Theta = W_0 \cdot \sqrt{\tau} / (A + B \cdot \sqrt{\tau}), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (26)$$

10. Сделать вывод о закономерности изменения температуры в опоре с течением времени.

Пример решения задачи

Исходные данные:

$d_1 = 0,11$ м; $d_2 = 0,12$ м; $D = 0,2$ м; $l = 0,08$ м; материал вала – сталь 40Х; материал подшипника – чугун СЧ30; материал корпуса – сталь 45; момент трения в подшипнике $M_{\text{ТР}} = 5,7$ Н·м; частота вращения $n = 14$ с⁻¹.

Рассчитать температуру через следующие промежутки времени:

$\tau_1 = 4$ мин; $\tau_2 = 8$ мин; $\tau_3 = 25$ мин; $\tau_4 = 60$ мин; $\tau_5 = 180$ мин;

1. Определяем мощность тепловыделения в подшипнике в начальный момент времени по формуле (16):

$$W = 2 \cdot 3,14 \cdot 5,7 \cdot 14 \approx 501 \text{ Вт}$$

2. Рассчитываем коэффициент формы для вала, используя формулы (17), (18):

Для промежутка времени $\tau_1 = 240$ сек

$$F_{C1} = 0,067 \cdot 10^{-4} \cdot 240 / 0,11^2 = 1329 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем: $c = 3,3$ и $m = 0,3$, т. к. $0,1 \leq F_{C1} \leq 10$

$$\text{Тогда: } L_{B1} = 3,3 \cdot (1329 \cdot 10^{-4})^{0,3} = 1,8$$

Для промежутка времени $\tau_2 = 480$ сек

$$F_{C2} = 0,067 \cdot 10^{-4} \cdot 480 / 0,11^2 = 2658 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем: $c = 3,3$ и $m = 0,3$, т. к. $0,1 \leq F_{C2} \leq 10$

$$\text{Тогда: } L_{B2} = 3,3 \cdot (2658 \cdot 10^{-4})^{0,3} = 2,19$$

Для промежутка времени $\tau_3 = 1500$ сек

$$F_{C3} = 0,067 \cdot 10^{-4} \cdot 1500 / 0,11^2 = 8306 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем: $c = 3,3$ и $m = 0,3$, т. к. $0,1 \leq F_{C3} \leq 10$

$$\text{Тогда: } L_{B3} = 3,3 \cdot (8306 \cdot 10^{-4})^{0,3} = 3,12$$

Для промежутка времени $\tau_4 = 3600$ сек

$$F_{C4} = 0,067 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 / 0,11^2 = 19933 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем: $c = 3,3$ и $m = 0,3$, т. к. $0,1 \leq F_{C4} \leq 10$

$$\text{Тогда: } L_{B4} = 3,3 \cdot (19933 \cdot 10^{-4})^{0,3} = 4,06$$

Для промежутка времени $\tau_5 = 10800$ сек

$$F_{C5} = 0,067 \cdot 10^{-4} \cdot 10800 / 0,11^2 = 59802 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем: $c = 3,3$ и $m = 0,3$, т. к. $0,1 \leq F_{C5} \leq 10$

$$\text{Тогда: } L_{B5} = 3,3 \cdot (59802 \cdot 10^{-4})^{0,3} = 5,64$$

3. Рассчитываем эквивалентный коэффициент теплопроводности втулки и корпуса по формуле (19):

$$\varepsilon_1 = \frac{(d_2 - d_1) / 2}{d_1 / 2} = \frac{(0,12 - 0,11) / 2}{0,12 / 2} = 0,083; \quad \varepsilon_2 = \frac{(D - d_2) / 2}{D / 2} = \frac{(0,2 - 0,12) / 2}{0,2 / 2} = 0,4$$

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\ln(0,1/0,055)}{\frac{1}{39,8} |\ln(1-0,083)| + \frac{1}{40,2} |\ln(1-0,4)|} = 40,17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{C})$$

4. Рассчитываем эквивалентный коэффициент температуропроводности, используя формулы (20), (21):

$$V_2 = (\pi R_2^2 - \pi R_1^2) \cdot H = (\pi \cdot 0,06^2 - \pi \cdot 0,055^2) \cdot 0,08 = 1,444 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$V_3 = (\pi R^2 - \pi R_2^2) \cdot H = (\pi \cdot 0,1^2 - \pi \cdot 0,06^2) \cdot 0,08 = 5,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$(\rho c)_{\text{экв}} = \frac{(39,8 \cdot 1,444 \cdot 10^{-4} / 0,113 \cdot 10^{-4}) + (40,2 \cdot 5,12 \cdot 10^{-4} / 0,08 \cdot 10^{-4})}{1,444 \cdot 10^{-4} + 5,12 \cdot 10^{-4}} = 4694385 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{C})$$

$$\omega_{\text{экв}} = 40,17 / 4694385 = 0,086 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$$

5. Рассчитываем коэффициент формы втулки с корпусом по формуле (22):

$$\varepsilon = \frac{(D - d_1)/2}{D/2} = \frac{(0,2 - 0,11)/2}{0,2/2} = 0,45$$

Тогда:

$$L_A = \frac{1}{0,45} \cdot |\ln(1 - 0,45)| \approx 1,33$$

6. Рассчитываем коэффициент b^* по формуле (23):

$$b_1^* = \left(1 + \frac{40,17}{33,9} \cdot \frac{1,8}{1,33} \cdot \sqrt{\frac{0,067 \cdot 10^{-4}}{0,086 \cdot 10^{-4}}}\right)^{-1} = 0,41$$

$$b_2^* = \left(1 + \frac{40,17}{33,9} \cdot \frac{2,19}{1,33} \cdot \sqrt{\frac{0,067 \cdot 10^{-4}}{0,086 \cdot 10^{-4}}}\right)^{-1} = 0,37$$

$$b_3^* = \left(1 + \frac{40,17}{33,9} \cdot \frac{3,12}{1,33} \cdot \sqrt{\frac{0,067 \cdot 10^{-4}}{0,086 \cdot 10^{-4}}}\right)^{-1} = 0,29$$

$$b_4^* = \left(1 + \frac{40,17}{33,9} \cdot \frac{4,06}{1,33} \cdot \sqrt{\frac{0,067 \cdot 10^{-4}}{0,086 \cdot 10^{-4}}}\right)^{-1} = 0,24$$

$$b_5^* = \left(1 + \frac{40,17}{33,9} \cdot \frac{5,64}{1,33} \cdot \sqrt{\frac{0,067 \cdot 10^{-4}}{0,086 \cdot 10^{-4}}}\right)^{-1} = 0,18$$

7. Рассчитаем коэффициент А по формуле (24):

$$A_1 = \frac{3,14^{3/2}}{2} \cdot \frac{33,9}{\sqrt{0,067 \cdot 10^{-4}}} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,08}{0,41 \cdot 1,8} = 434$$

$$A_2 = \frac{3,14^{3/2}}{2} \cdot \frac{33,9}{\sqrt{0,067 \cdot 10^{-4}}} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,08}{0,37 \cdot 2,19} = 395$$

$$A_3 = \frac{3,14^{3/2}}{2} \cdot \frac{33,9}{\sqrt{0,067 \cdot 10^{-4}}} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,08}{0,29 \cdot 3,12} = 354$$

$$A_4 = \frac{3,14^{3/2}}{2} \cdot \frac{33,9}{\sqrt{0,067 \cdot 10^{-4}}} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,08}{0,24 \cdot 4,06} = 329$$

$$A_5 = \frac{3,14^{3/2}}{2} \cdot \frac{33,9}{\sqrt{0,067 \cdot 10^{-4}}} \cdot \frac{0,11 \cdot 0,08}{0,18 \cdot 5,64} = 316$$

8. Рассчитаем значение коэффициента В по формуле (25):

$$B = 501 \cdot 0,01 + 1,84 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 5,93$$

9. Рассчитаем избыточную температуру опоры по формуле (26):

Для промежутка времени $\tau_1 = 180$ сек

$$\Theta_1 = 501 \cdot \sqrt{180} / (434 + 5,93 \cdot \sqrt{180}) = 13,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для промежутка времени $\tau_2 = 480$ сек

$$\Theta_2 = 501 \cdot \sqrt{480} / (395 + 5,93 \cdot \sqrt{480}) = 20,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для промежутка времени $\tau_3 = 1500$ сек

$$\Theta_3 = 501 \cdot \sqrt{1500} / (354 + 5,93 \cdot \sqrt{1500}) = 33,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для промежутка времени $\tau_4 = 3600$ сек

$$\Theta_4 = 501 \cdot \sqrt{3600} / (329 + 5,93 \cdot \sqrt{3600}) = 43,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Для промежутка времени $\tau_5 = 10800$ сек

$$\Theta_5 = 501 \cdot \sqrt{10800} / (316 + 5,93 \cdot \sqrt{10800}) = 55,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\tau, \text{ с} \dots\dots\dots 180 \quad 480 \quad 1500 \quad 3600 \quad 10800$

$\Theta, \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots 13,1 \quad 20,9 \quad 33,2 \quad 43,9 \quad 55,8$

По результатам расчётов строим график зависимости температуры $\Theta, \text{ } ^\circ\text{C}$ от времени $\tau, \text{ с}$ (рисунок 19).

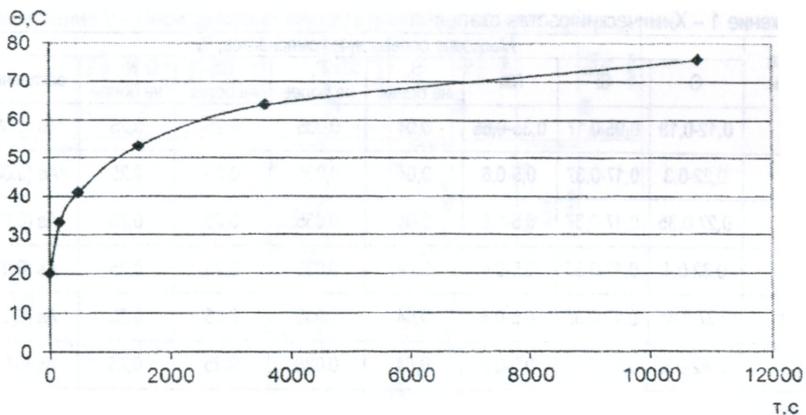


Рисунок 19 – График зависимости температуры опоры от времени

Контрольные вопросы

1. С какой целью выполняют анализ тепловых процессов в технологическом оборудовании?
2. Сформулируйте алгоритм расчета температуры в подшипнике скольжения.
3. Что такое коэффициент формы цилиндра относительно полупространства?
4. Прокомментируйте структурную схему теплообмена в подшипнике скольжения.
5. Какие допущения делают при расчете температуры на поверхности контакта между парой трения?

Приложение 1 – Химический состав сталей

Марка стали	Массовое содержание компонентов, %							
	C	Si	Mn	S, не более	P, не более	Cr, не более	Ni, не более	остальные
15	0,12-0,19	0,05-0,17	0,35-0,65	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
25	0,22-0,3	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
30	0,27-0,35	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
35	0,32-0,4	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
45	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
50	0,47-0,55	0,17-0,37	0,5-0,8	0,04	0,035	0,25	0,25	As (0,08)
14Г2	0,12-0,18	0,17-0,37	1,2-1,6	0,04	0,035	0,3	0,3	Cu (0,3)
20ХГ2Ц	0,19-0,26	0,4-0,7	1,5-1,9	0,045	0,045	0,9-1,2	0,3	Zr (0,05-0,14)
10ХНДП	0,12	0,17-0,37	0,3-0,6	0,04	0,07-0,12	0,5-0,8	0,3-0,6	Al (0,08-0,15)
10ХСНД	0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	0,04	0,035	0,6-0,9	0,5-0,8	Cu (0,4-0,6)
15ХСНД	0,12-0,18	0,4-0,7	0,4-0,7	0,04	0,035	0,6-0,9	0,3-0,6	Cu (0,4-0,6)
20Х	0,17-0,23	0,17-0,37	0,5-0,8	0,025	0,025	0,7-1,0	0,3	Cu (0,3)
30Х	0,24-0,32	0,17-0,37	0,5-0,8	0,035	0,035	0,8-1,0	0,3	Cu (0,3)
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,035	0,035	0,8-1,1	0,3	Cu (0,3)
30ХГСА	0,28-0,34	0,9-1,2	0,8-1,1	0,025	0,025	0,8-1,1	0,3	Cu (0,3)
40ХН2МА	0,37-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,015	0,025	0,6-0,9	1,25-1,6	Mo (0,2)
38Х2НМ	0,32-0,42	0,17-0,37	0,5-0,8	0,03	0,03	1,8-2,3	0,6-0,9	Mo (0,2-0,3)
30ХГТ	0,24-0,32	0,17-0,37	0,8-1,1	0,035	0,035	1,0-1,3	0,3	Ti (0,03-0,09)
25ХГМ	0,23-0,29	0,17-0,37	0,9-1,2	0,025	0,025	0,9-1,2	–	–
А12	0,08-0,16	0,15-0,35	0,7-1,0	0,08-0,2	0,08-0,15	–	–	–
А45Е	0,42-0,5	0,17-0,37	0,5-0,8	0,06	0,04	0,25	0,25	Se (0,04-0,1)
АС14ХГН	0,13-0,18	0,17-0,37	0,7-1,0	0,035	0,035	0,8-1,1	0,8-1,1	Pb (0,2-0,25)
60С2	0,57-0,65	1,5-2,0	0,6-0,9	0,025	0,025	0,3	–	–
50ХГ	0,46-0,54	0,17-0,37	0,7-1,0	0,025	0,025	0,9-1,2	–	–
65С2ВА	0,61-0,69	1,5-2,0	0,7-1,0	0,015	0,025	0,3	–	W (0,8-1,2)

Приложение 3 – Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов

Материал	Марка	λ , Вт/(м ⁰ С)	$\omega \cdot 10^{-4}$, м ² /с	$c\rho \cdot 10^6$, Дж/м ³ °С
Сталь углеродистая	40	38,5	0,076	5,06
	45	40,2	0,080	5,02
	30Х	35,2	0,072	4,89
	40Х	33,9	0,067	5,06
	ШХ15	33,4	0,065	5,15
	20ХН3А	33,5	0,066	5,07
	30ХГС	36,0	0,070	5,14
Сталь аустенитного класса	20Х23Н18	21,5	0,050	4,30
	110Г13Л	22,2	0,042	5,28
	12Х18Н9Т	22,6	0,050	4,52
	14Х17Н2	25,0	0,060	4,17
Сталь инструментальная	У12	34,7	0,071	4,89
	ХВГ	27,2	0,054	5,04
	Р18	27,2	0,057	4,77
Жаропрочный сплав	ВТ4	12,9	0,043	3,01
	ХН77ТЮР	19,7	0,041	4,8
Чугун	СЧ30	39,8	0,113	3,52
Твердый сплав	ВК8	54,4	0,246	2,21
	Т14К6	33,9	0,110	3,08
	Т15К6	27,2	0,100	2,72
Медь		361,0	0,990	3,65
Бронза		64	0,2	3,6
Константан		27,2	0,076	3,56

Учебное издание

Составители:
Ярослав Владимирович Кудрицкий
Виктор Александрович Сокол

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу
«Тепловые процессы в технологических системах»
для студентов специальности
1-36 01 01 «Технология машиностроения» и
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»
дневной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: В.А. Сокол
Редактор: Т.В. Строкач
Компьютерная верстка: Е.А. Боровикова
Корректор: Е.В. Никитчик

Подписано к печати 7.02.2012 г. Формат 60×84 1/16. Бумага «Снегурочка». Усл. п. л. 1.63.
Уч. изд. л. 1,75 . Тираж 50 экз. Заказ № 178. Отпечатано на ризографе учреждения
образования «Брестский государственный технический университет».
224017 г. Брест, ул. Московская, 267.