

Калугин Ю. К., Лещик С. Д.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ФРИКЦИОННО-ИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРЫ ТРЕНИЯ

Введение. Динамика процессов трения и износа неразрывно связана с фрикционно-износными свойствами материалов пары трения, которые, в свою очередь, зависят от скоростного, нагрузочного и температурного режимов на фрикционном контакте с учетом влияния окружающей среды. В связи с этим при нестационарном процессе трения изменение всех параметров процесса во времени взаимообусловлено.

Фрикционно-износные характеристики материалов пары трения могут изменяться на 200...400 % и более по сравнению с исходными [1, 2]. Эти изменения существенно сказываются на силе (моменте) трения и долговечности узла трения по фактору износа. Определение статистически достоверных рабочих характеристик трения и износа требует длительных и дорогостоящих стендовых и лабораторных испытаний на модельных образцах при физическом моделировании трения и износа.

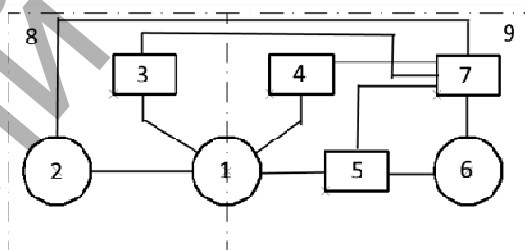
Методика расчета изменения тепловых полей в паре трения, а также коэффициента трения и степени износа твердых тел, разработанная известными учеными И. В. Крагельским, Н. Б. Демкиным, Н. А. Буше, А. В. Чичинадзе и др., – это совокупность теоретических и научно обоснованных практических методов, позволяющих на стадии проектирования рассчитать и исследовать рабочие характеристики узлов трения с разными парами трения с целью выбора варианта, близкого к оптимальному для заданных условий эксплуатации [3, 4]. Получившие наибольшую известность методы исследования тепловых процессов, возникающих при трении образцов и контртела, преимущественно основаны на математическом анализе теплофизических явлений. Зачастую результаты, полученные при использовании математического моделирования, не отражают сущность явлений и замедляют получение достоверной трибологической информации. По этой причине перспективным направлением в конструировании оборудования является имитационное моделирование с применением компьютерных систем. Значимым преимуществом этого метода, перед другими методами, является возможность воссоздания точной копии реального механизма и протекающих в нем процессов.

Цель данных исследований – установить закономерности распределения тепловых полей в узле трения с учетом входных и внутренних факторов зоны трения, на основе результатов моделирования и использования средств инженерного анализа.

Методика и результаты исследования. Для проведения имитационного моделирования на кафедре машиноведения и технической эксплуатации автомобилей, факультета инновационных технологий ГрГУ им. Я.Купалы, были разработаны и созданы 3D-модели узлов теплотехнической машины трения с фактическими проектными размерами. В качестве программного продукта была выбрана инновационная система гибридного параметрического проектирования T-FLEX CAD, основанная на геометрическом ядре Parasolid® и обладающая полным набором инструментов, необходимых для создания 3D-моделей любой сложности, и универсальный модуль инженерного анализа, входящий в ее состав [5]. Важнейшей особенностью системы проектирования является возможность создания изменяемых трехмерных моделей. Такой вид моделирования является значительным шагом в освоении автоматизированной конструкторской подготовки производства. Использование технологий 3D-моделирования позволяют существенно сократить затраты на проектирование, выпуск и

испытание опытных образцов и дорогостоящей оснастки на пробные партии изделий. Это достигается за счет 3D-моделирования деталей и сборок в их естественном виде, проверки собираемости, связи САПР T-FLEX CAD 3D с программами конечно-элементного анализа (для проведения прочностного анализа) и оценивания теплофизических процессов, происходящих в определенном узле. Перспективным для инженера-конструктора является интегрированное приложение для проектирования в виртуальной реальности (VR). T-FLEX VR может применяться на всех этапах подготовки изделия: планирования, проектирования, согласования и приемки, послепродажного обслуживания и обучения. При этом пользователям предоставляется возможность не только проводить визуальный анализ изделия, проверять его эргономичность, оценивать дизайн, но и вести реальное проектирование в виртуальном пространстве.

Структурная схема спроектированной машины трения состоит из двух основных блоков: модуля закрепления и прижима образцов и модуля фрикционной нагрузки на диск (рисунок 1).



1 – узел трения; 2 – привод фрикционного диска; 3 – регулятор нагрузки; 4 – блок измерения момента трения; 5 – стабилизатор нагрузки; 6 – привод устройства прижима образцов; 7 – блок управления и измерения выходных параметров; 8 – узел привода фрикционного диска; 9 – узел прижима и закрепления образцов

Рисунок 1 – Структурная схема машины трения

В проектируемой машине трения применяются два приводных устройства 2 и 6. Приводное устройство 2 предназначено для передачи вращательного движения к фрикционному диску, который входит в состав узла трения 1. В узел трения входит также и прижимной диск с образцами, который обеспечивает равномерную стабилизированную нагрузку на контактирующие элементы. Стабилизация нагрузки осуществляется приводом 6 через промежуточный преобразователь движения 5. Зона трения проектируемой машины охлаждается с помощью вентилятора. Устройство регулирования нагрузки 3 подключается к блоку управления и позволяет изменять силу прижима образцов посредством преобразования движения. Блок 4 предназначен для контроля момента трения.

В модуле закрепления и приложения нагрузки осуществляется закрепление трех цилиндрических образцов диаметром 10 мм на основании диска. Образцы равномерно прижимаются к фрикционному диску с помощью приводного устройства, при этом величина действующего усилия прижима может изменяться по заданной программе. Конструкция узла для регулирования нагрузки, сформированного с помощью трехмерных моделей, показана на рисунке 2.

Калугин Юрий Константинович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета им. Я. Купалы, доцент.

Лещик Сергей Дмитриевич, к.т.н., заведующий кафедрой машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета им. Я. Купалы, доцент.

Беларусь, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

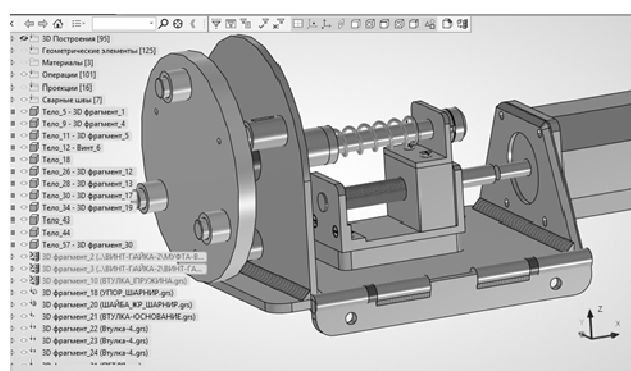


Рисунок 2 – Общий вид разработанного модуля закрепления и прижима образцов

Для проектируемой установки была использована методика, позволяющая совместить простоту механизма пружинного нагружения, точность и стабильность нормированного нагружения с помощью независимого привода, на основе шагового двигателя. В спроектированной установке плавность приложения силы обеспечивается пружинным компенсатором, основным элементом которого является пружина.

Исходя из общих позиций теплотехники [2, 3], распределение тепловых потоков в значительной степени зависит от скорости перемещения источника тепла по поверхности. При взаимодействии контактирующих поверхностей важное значение имеет коэффициент теплопроводности материала. В зависимости от соотношения коэффициентов изменяется количество отводимого от поверхностей тепла. Общее количество теплоты в соответствии с условием теплового баланса в этом случае [1]:

$$Q_{вых} = Q_{отв} + Q_{нагр} \quad (1)$$

При перемещении образца по поверхности контртела с большой скоростью некоторая часть тепла расходуется на подогрев постоянно вступающих в контакт участков поверхности. Значение температуры нагрева сегмента поверхности, определяемого траекторией скольжения образцов, определяется массой материала, по которому перемещается образец. В практических расчетах для выбора алгоритма расчета вводится число Пекле. В зависимости от его значения выбирается алгоритм вычисления температурных значений. В нашем случае число Пекле имеет значения $Pe > 0,3$, откуда следует, что дальнейшие расчеты будут выполняться по формулам (2, 3, 4) [1]. Для движущейся поверхности имеет место соотношение [1]:

$$a_{T1} = \frac{\lambda_1}{\gamma_1 \cdot c_1} \quad \text{и} \quad Pe_1 = \frac{v_s \cdot l}{a_{T1}} \quad (2)$$

Для этого случая приращение температуры выражается с помощью формулы [1]:

$$\Delta t^0 = \frac{f \cdot F_n \cdot v_s}{2\lambda \cdot A + \lambda_1 \cdot Pe_1 \cdot l} \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов, A – площадь поверхности контакта, l – характерный размер.

Принимая $A = l^2$ и $p = F_n/A$, получим окончательное уравнение для расчета температуры в зоне контакта [1]:

$$\Delta t^0 = \frac{f \cdot p \cdot v_s \cdot l}{2\lambda + \lambda_1 \cdot Pe_1} \quad (4)$$

Подставляя заданные значения скорости скольжения и параметры образцов и контртела, проведем анализ изменения выходных параметров. Результаты расчетов представлены на диаграмме (рисунок 3).

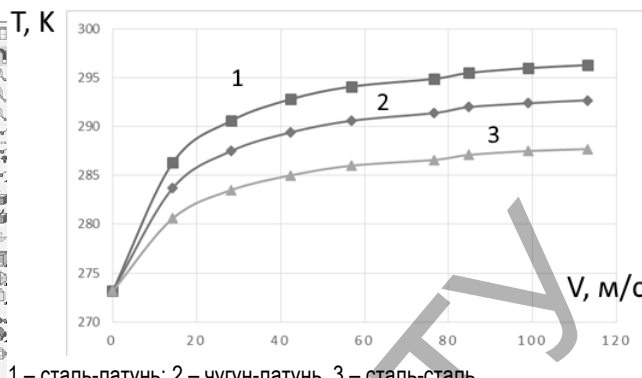


Рисунок 3 – Зависимость температуры в зоне контакта от начальных параметров при испытании образца

Зависимость, приведенная на диаграмме (рисунок 2), характеризует увеличение температуры в зоне контакта под воздействием входных и внутренних факторов, которое теоретически объясняется перераспределением тепловых потоков. Для выявления зависимости трибологических свойств от величины суммарной нагрузки был проведен аналитический расчет температуры в зоне трения по приведенной выше методике. В процессе расчета учитывались материалы образцов и фрикционной части. На основании результатов расчета был построен график зависимости приращения температуры от нагрузки (рисунок 4).

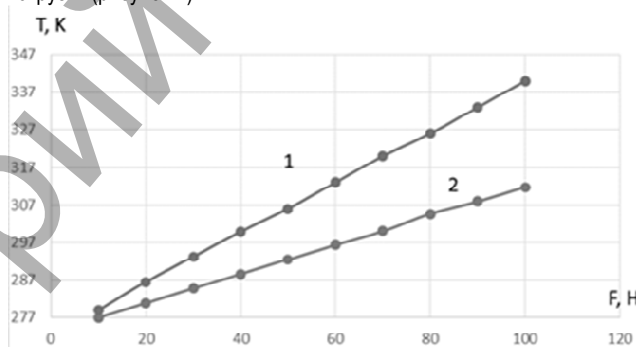


Рисунок 4 – Зависимость температуры в зоне контакта от нагрузки

Исходя из представленных диаграмм, при частоте вращения диска $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ скорость скольжения $V = 56,5 \text{ м/с}$. При таком значении скорости приращение температуры в зоне контакта будет достигать $t = 290,6 \text{ К}$ для пары материалов – чугун-латунь и соответственно $t = 294,1 \text{ К}$ для пары сталь-латунь и $t = 286,0 \text{ К}$.

В соответствии с выбранной методикой эксперимента значение температуры для подстановки в качестве начальных параметров было выбрано при действующем среднем по заданию проекта значению нагрузки – $F = 100 \text{ Н}$. Эксперименты показали, что для материалов контактирующих элементов сталь-латунь для заданной нагрузки значение температуры в поверхностном слое материалов в зоне трения установилось – $t_1 = 313 \text{ К}$, а для сочетания материалов сталь-сталь – $t_2 = 340 \text{ К}$. Значительное снижение температуры в случае использования материалов сталь-латунь объясняется повышением теплоотдачи в массивный диск – основание для закрепления образцов. Точные значение температуры в зоне трения сложно спрогнозировать, но возможно приблизить результаты к реальным, при непосредственном контроле или провести анализ тепловых полей для отдельных деталей посредством конечно-элементного анализа с помощью имитационных моделей.

Для нестационарных процессов конвективного теплообмена характерно изменение температур теплоносителей (или одного из них) во времени. Для нестационарной теплопроводности, перед выполнением расчёта с помощью модуля теплового анализа CAE системы,

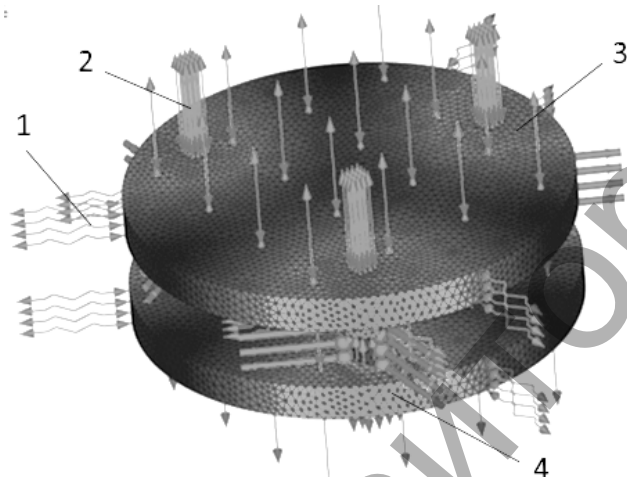
были заданы: конечное время моделирования, временной шаг и начальная температура, значение которой было сформировано из расчетных значений.

Тепловой анализ сформированного из трехмерных моделей узла трения осуществляется в несколько этапов:

1. Создание задачи. При создании задачи принимались во внимание условия изменения тепловых полей, которые в данном случае характеризуются как нестационарные. Для такого случая расчёт температурных полей осуществляется в функции времени. Источники тепловой энергии, температуры, а также термодинамические свойства системы могут изменяться во времени. В анализируемой физической системе происходит изменение распределения температурных полей с течением времени, и в результате расчёта мы получаем поля температур в каждый момент времени заранее определенного временного интервала.

2. Наложение граничных условий. В тепловом анализе роль граничных условий выполняют прикладываемые к модели граничные и начальные температуры, источники тепловой мощности, тепловые потоки, тепловые контакты, а также условия теплообмена модели с окружающей средой – конвекция и излучение.

Результатами теплового анализа являются: температурные поля – распределение температуры по объёму модели и градиенты температуры по осям X, Y, Z, а также модуль градиента температуры. Для нашего случая после задания начальной температуры, интервала времени и выполнения расчета была сформирована эпюра распределения тепловых потоков (рисунок 5)



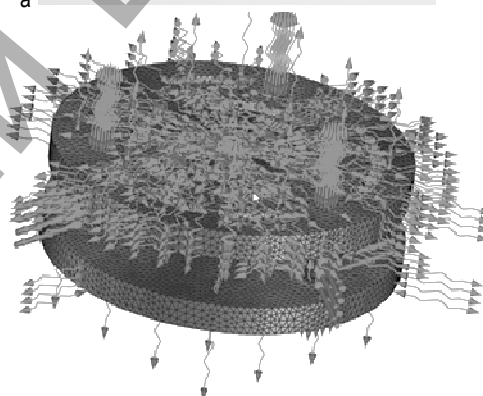
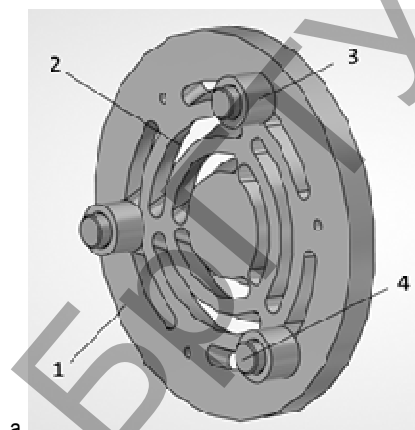
1– конвекционные тепловые потоки; 2– зона интенсивного тепловыделения; 3– зона изменения температуры; 4– зона повышенного тепловыделения

Рисунок 5 – Имитационная модель теплофизических процессов в узле трения

На рисунке 5 показано распределение тепловых потоков после установления начальных значений температуры. Система инженерного анализа позволяет с достаточно высокой точностью определить температурные параметры не только на поверхности, но и в глубинных слоях металла [2, 3]. Приращение температуры прижимного диска в радиусе 15 мм от источника нагрева (зона трения каждого образца) составило – $t_{11} = 309$ K, в радиусе 37 мм составило – $t_{12} = 283$ K по встроенной цветовой температурной шкале. В соответствии с заданием контролировалась температура прижимного диска с образцами. Имитационная модель тепловых процессов в узле трения была сформирована для изучения влияния конструкции диска на конвекционные тепловые потоки и, как следствие, на конечную температуру в зоне трения. Выявлено, что изменение условий теплоотдачи в окружающую среду зависит от конструкции прижимного диска и принудительной вентиляции.

Для оценивания возможности уменьшения и регулирования приращения температуры в зоне контакта при трении был проведен

тепловой анализ нестационарных тепловых потоков с изменённой конструкцией прижимного диска. В трехмерную модель, характеризующую конструкцию диска, были внесены следующие изменения: изменен материал, из которого изготовлен диск (задан материал – алюминий), по разработанной схеме выполнены концентрические наклонные прорезы, улучшающие конвекционные свойства теплоносителя. Проведенное сравнительное моделирование для одинаковых условий показало эффективность предложенных конструктивных решений (рисунок 6).



а – измененная конструкция диска для образцов, **б** – взаимодействие тепловых полей в оптимизированном узле трения

Рисунок 6 – Имитация тепловых процессов в узле трения после изменения конструкции прижимного диска машины трения

На снимке с экрана (рисунок 6), можно выявить значительное увеличение конвекционных тепловых потоков, что в свою очередь привело к некоторому уменьшению поверхностной температуры диска с образцами и температуры, непосредственно в зоне трения.

Заключение. Таким образом, приращение температуры прижимного диска после изменения конструкции в радиусе 15 мм от источника нагрева (зона трения каждого образца) составило $t_{11} = 298$ K, в радиусе 27 мм составило – $t_{12} = 279$ K, по встроенной цветовой температурной шкале. Изменение конечных значений по результатам сравнения тепловых диаграмм составило: для зоны излучения тепла (в радиусе 15 мм) составило – $\Delta t_{11} = 11$ K, в радиусе 37 мм составило – $\Delta t_{12} = 4$ K. Результаты могут быть существенно улучшены при использовании внешней системы, управляемой с помощью микроконтроллера.

Дальнейшие исследования трибологических свойств материалов и образцов в зоне трения предполагают изучение факторов, влияющих на коэффициент трения и интенсивность износа при запрограммированном динамическом изменении скорости относительного движения диска и образцов (в том числе при реверсировании и полной остановке фрикционного диска с последующим ступенчатым запуском).