

УДК 621.891

О. А. МИКОСЯНЧИК, А. П. КУДРИН, Р. Г. МНАЦКАНОВ, А. Е. ЯКОБЧУК,
В. В. ТОКАРУК

Национальный авиационный университет, Украина

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ ПРИ КАЧЕНИИ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

Рассмотрено влияние скорости скольжения при качении с проскальзыванием на интенсивность тепловыделения в локальном контакте в различных режимах смазочного действия. Показана целесообразность использования различных методик расчета повышения температуры в фрикционном контакте в условиях доминирования эластогидродинамического и граничного режимов смазочного действия. Приведены результаты численного расчета, показывающие возможности используемых методик.

Ключевые слова: *интенсивность тепловыделения, тепловыделение в смазочном слое, критическая температура, проскальзывание, скорость скольжения.*

Введение и постановка задач исследований. В условиях перехода трибо-системы в критические режимы работы, к которым относятся повышенные нагрузки, высокие скорости скольжения, нестационарные условия работы (режим пуск – остановка), возникает вероятность нарушения сплошности смазочного слоя. При этом в контакте возможен переход от гидро- и эластогидродинамического режимов к граничному режиму смазочного действия. В таких условиях значительно нарушается теплоотвод из зоны трения, в контакте возникают локальные участки, характеризующиеся резким повышением температуры. Таким образом, именно в зоне фактического контакта возникают физические процессы, обуславливающие силу трения и связанные с нею тепловые явления и износ. Существует ряд методик определения интенсивности тепловыделения в триботехническом контакте, однако они не учитывают возможность периодической смены режимов трения, происходящей при переходе трибосистемы в критические режимы работы.

Трение представляет собой процесс преобразования энергии. Согласно [1], при трении происходит преобразование внешней механической энергии в энергию внутренних процессов. В данной работе предложена оценка энергетических процессов при трении на макроуровне по коэффициенту потерь на трение. Данный параметр отображает диссипативный характер процесса трения, учитывая энергетические потери в трибосистеме. Коэффициент потерь на трение зависит не только от свойств контактирующих тел, но и от нагрузки, скорости скольжения, условий окружающей среды и др.

В температурных задачах трения применительно к высокоскоростным и тяжело нагруженным узлам трения спорным является также правомочность использования одномерного уравнения теплопроводности Фурье с постоянными коэффициентами теплопроводности, теплоемкости, плотности и температуропроводности материалов контактных поверхностей [2]. Однако авторы приводят методику, по которой расчеты тепловых процессов в самых разнообразных и конкретных конструкциях узлов трения подтверждаются экспериментами, а также прогнозируемым износом трущихся пар [3; 4].

Линейная корреляция между износом и рассеиваемой энергией установлена в работах [5; 6]. Кроме того, количественный показатель диссипации энергии можно рассматривать как показатель изменений механических и структурных свойств контактирующих тел.

Применение смазочных материалов создает предпосылки для эффективного отвода тепла из зоны трения. В работе [7] предложена модель прогнозирования температуры в линейном контакте с учетом степенной реологической зависимости неньютоновского поведения смазочного материала. Установлено, что средняя температура в смазочной пленке является суммой таких составляющих, как повышение температуры вспышки, прирост температуры за счет внутреннего нагрева пленки и величиной температуры масла на входе в контакт [8]. Модель, предложенная [9] рассматривает распределение температуры в пределах зоны контакта двух шероховатых поверхностей. Анализ влияния шероховатости на повышение локальной температуры в зоне контакта приводится в работе [10]. Самое высокое увеличение температуры составляет приблизительно 220 °С на площади около 3% от номинальной площади контакта. Средняя температура в пределах зоны контакта находится в диапазоне от 150 до 220 °С.

Расхождение в расчетах по повышению температуры в контакте при трении в процессе деградации смазки при схватывании контактных поверхностей, которая определена по химической кинетической модели и механической модели могут составлять до 100 °С [11].

Таким образом, из представленного анализа литературных данных к вопросу оценки температурного состояния триботехнического контакта следует, что не существует единого подхода к выбору методики расчета температуры в контакте. Существующие методы оценки влияния температурного фактора на состояние смазочного слоя базируются на основных принципах эластогидродинамической теории смазки. Однако, для пар трения с локальным контактом, к которым относятся зубчатые передачи, условия работы относятся преимущественно к нестационарным режимам (циклическая смена запуск - остановка). При этом в процессе одного рабочего цикла режим смазки может изменяться от полусухого до гидродинамического. В связи с этим, использование только эластогидродинамических критериев при оценке температуры в контакте представляется не совсем корректным. Более правильным методическим подходом является повышение достоверности оценки параметров теплового состояния триботехнического контакта путем анализа повышения температуры в граничных условиях трения. Именно параметры граничного режима смазки являются доминирующими в плане прогнозирования противоизносных характеристик контакта.

Учитывая сказанное выше, изучение процессов тепловыделения в триботехническом контакте в условиях работы трибосистемы в разных режимах смазки представляет несомненный научный и практический интерес.

Цель работы – установление доминирующих факторов, влияющих на тепловыделение в локальном контакте и износ пар трения в различных режимах смазки в условиях качения со скольжением.

Методика проведения эксперимента. Разработанная методика оценки температурной стойкости граничных пленок смазочного материала заключается в следующем:

– провести приработку контактных поверхностей в нестационарных условиях трения (режим пуск – остановка) на автоматизированном триботехническом комплексе, основные характеристики которого приведены в работе [12];

– при контактном давлении по Герцу (100 – 500 МПа) в условиях качения с разной степенью проскальзывания (от 3 до 40%) создать условия обильного поступления исследуемого смазочного материала в зону трения;

– провести приработку пар трения и осуществлять последующую наработку до стабилизации основных триботехнических показателей контакта (толщины смазочного слоя на стоянке, в пусковой период и в период, соответствующий выбранным максимальным скоростям качения опережающей и отстающей поверхностей; коэффициента трения; удельной работы трения), которые характеризуют формирование стабильного граничного слоя компонентами смазочного материала;

– прекратить подачу смазочного материала в зону трения, ветошью удалить остатки смазочного материала с контактных поверхностей;

– фиксировать изменение основных триботехнических показателей контакта до проявления первых признаков схватывания контактных поверхностей;

– провести оценку условий возникновения заедания по критической температуре в зоне контакта элементов трибосопряжения.

В качестве образцов использовались ролики из стали 45 (HRC 38, Ra 0,57мкм). Смазывание контактных поверхностей осуществлялось окунанием нижнего ролика в ванночку с маслом. В качестве смазочного материала использовалось минеральное трансмиссионное масло для механических коробок передач и главных передач легковых и грузовых автомобилей Okko GL-4 80w/90. Объемная температура масла – 20 °С.

Максимальная частота оборотов для опережающей поверхности составила 1000 об/мин. В работе имитировалось проскальзывание 3, 10, 20, 30 и 40 %. Максимальное контактное напряжение по Герцу – 250 МПа.

Приработка контактных поверхностей длительностью 100 циклов и последующая работа пар трения на протяжении 200 циклов осуществлялась в условиях обильной смазки, после чего при последующей наработке 100 циклов прекращалась подача смазочного материала. С 400 цикла создавался режим масляного голодания - принудительное удаление смазочного материала с контактных поверхностей путем вытирания роликов ветошью.

Оценка факторов, влияющих на интенсивность тепловыделения в фрикционном контакте.

Согласно [13], интенсивность тепловыделения в зоне трения зависит от мощности трения и определяется соотношением:

$$Q_{\text{выд}} = f N_l V_{\text{ск}}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения, N_l – погонная нагрузка, $V_{\text{ск}}$ – скорость скольжения.

Рассмотрим изменение интенсивности тепловыделения для исследуемых поверхностей в условиях качения с разной степенью проскальзывания. При достаточном поступлении смазочного материала в зону контакта, когда осуществляется эффективный теплоотвод, интенсивность тепловыделения при увеличении проскальзывания с 3 до 40% повышается, в среднем, в 40 раз (рис. 1). Более интенсивное тепловыделение установлено при условиях качения с проскальзыванием, превышающим 20%. Следует отметить, что независимо от степени проскальзывания контактных поверхностей, исследуемое трансмиссионное масло характеризуется

высокими смазывающими свойствами – сформированная толщина смазочного слоя составляет, в среднем, 5 – 6 мкм. Согласно расчетному критерию определения режима смазочного действия $\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$, в контакте, независимо от степе-

ни проскальзывания, реализуется гидродинамический режим смазочного действия. Таким образом, поверхности разделены достаточным количеством смазочного материала, который является важным регулятором теплового баланса в трибосистеме.

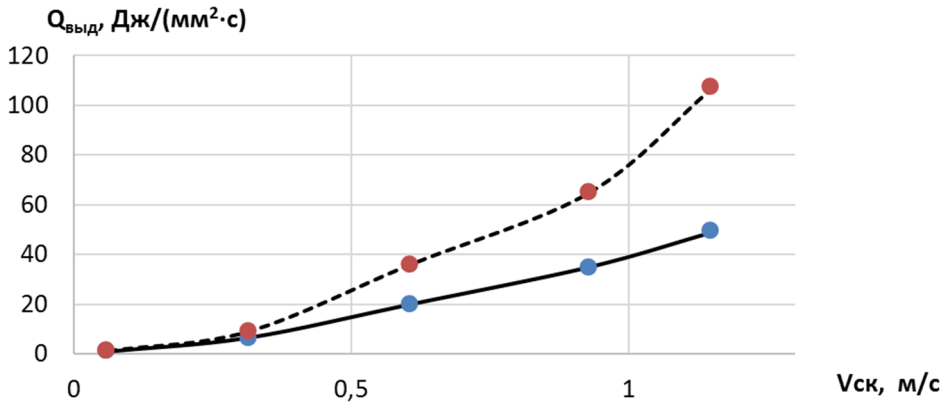


Рис. 1. Интенсивность тепловыделения в фрикционном контакте : 1 – в условиях обильной подачи смазочного материала в зону трения; 2 – в условиях прекращения подачи смазочного материала к контактным поверхностям; 1 – —●— ; 2 – - -●- -

Однако, в формуле (1) учитываются только антифрикционные свойства масла. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о повышении коэффициента трения, в среднем, в 2,2 раза при увеличении степени проскальзывания с 3 до 40% в условиях достаточного поступления смазочного материала в зону контакта. Однако, данный параметр не в полной мере отражает изменения, которые протекают в смазочном слое при увеличении скорости скольжения. Именно повышение $V_{ск}$ в 18 раз в исследуемом диапазоне проскальзывания является ведущим фактором, обуславливающим изменение реологических свойств смазочного материала [14]. На активированных трением контактных поверхностях образуются граничные смазочные слои различной природы, что является предпосылкой к разделению пленки смазочного материала на гидро- и негидродинамическую составляющую. Поэтому следует применять более глубокий анализ факторов, влияющих на интенсивность тепловыделения в фрикционном контакте.

В эксперименте после 400 цикла наработки смазочный материал принудительно удалялся с контактных поверхностей. В таких условиях гидродинамическая составляющая толщины смазочного слоя отсутствует. Поэтому основные смазочные, антифрикционные и противоизносные свойства трибоконтакта определяются стойкостью граничных смазочных слоев к механическим и температурным воздействиям. Наблюдалось резкое колебание толщины смазочного слоя, что приводило к ужесточению условий трения, которые проявляются в реализации полусухого, граничного и смешанного режимов смазочного действия (рис. 2).

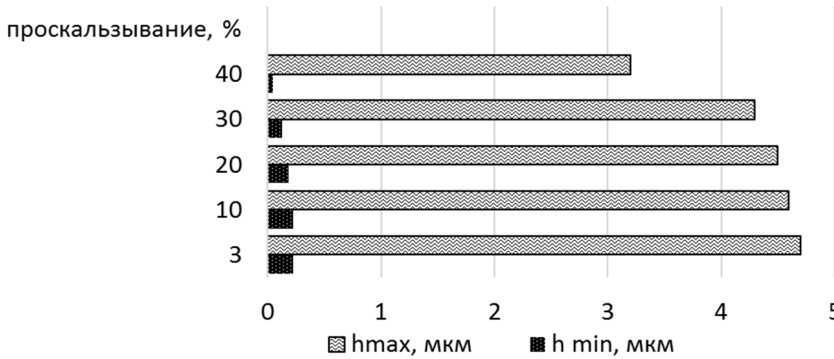


Рис. 2. Зависимость толщины смазочного слоя в контакте от величины проскальзывания в условиях качения

В условиях, когда отсутствует гидродинамическая составляющая толщины смазочного слоя, касательные напряжения сдвига локализируются в структурированных граничных слоях, обладающих иными реологическими свойствами, по сравнению с объемной фазой. Это приводит к возрастанию коэффициента трения, в среднем, в 2 раза, по сравнению с условиями достаточного поступления смазочного материала в зону контакта, для всех исследуемых контактных поверхностей, независимо от степени проскальзывания. Соответственно, параметр $fN_tV_{ск}$ в формуле (1), характеризующий мощность трения, повышается аналогично изменению коэффициента трения.

Увеличение мощности трения обуславливает повышенное тепловыделение в контакте. Интенсификация тепловыделения происходит при $V_{ск} > 0,6$ м/с, что соответствует проскальзыванию отстающей поверхности 20–40% (рис. 1). Это является ведущим фактором, способствующим десорбции граничных смазочных слоев, уменьшению негидродинамической составляющей толщины смазочной пленки и, как следствие, к возрастанию опасности заедания контактных поверхностей.

Расчет тепловыделения в смазочном слое в условиях гидродинамического и эластогидродинамического режимов смазочного действия.

Проанализируем уравнение баланса энергии для смазочного материала [15] при условии реализации гидро- либо эластогидродинамического режима смазочного действия, которое учитывает реологические и физические характеристики масла:

$$dQ_{\text{выд}}^* = dQ_{\text{отв}} + dQ_{\text{нагр}}, \quad (2)$$

где $dQ_{\text{выд}}^*$ – тепловыделение в смазочном слое элементарной толщины, $dQ_{\text{отв}}$ – теплоотвод в соседние слои смазки, $dQ_{\text{нагр}}$ – количество тепла, расходуемого на подогрев смазочного материала в зоне трения.

Примем что

$$dQ_{\text{выд}}^* = \tau l \frac{\partial u}{\partial y} dy = \mu \frac{\partial u}{\partial y} l \frac{\partial u}{\partial y} dy = \mu l \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (3)$$

$$dQ_{\text{отв}} = \lambda_0 l \frac{\partial^2 t^0}{\partial y^2} dy, \quad (4)$$

$$dQ_{\text{нагр}} = c_0 \rho_0 V_{ск} l \frac{\partial t^0}{\partial x} dy, \quad (5)$$

где τ – касательные напряжения сдвига смазочного слоя, $\frac{\partial u}{\partial y}$ – градиент скорости сдвига, μ – динамическая вязкость, ρ_0 – плотность смазочного материала,

c_0 и λ_0 – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности смазочного материала.

Тогда уравнение баланса энергии запишем в виде:

$$\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \lambda_0 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + c_0 \rho_0 V_{\text{ск}} \frac{\partial t^0}{\partial x} \quad (6)$$

В работе [15] при расчете температуры смазочного слоя приняты следующие допущения:

- теплоотводом в поверхности трения можно пренебречь;
- температура поперек смазочного слоя постоянна;
- температура смазки изменяется только по длине смазочного слоя.

Если температура поперек смазочного слоя постоянна, то

$$\frac{\partial t^0}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 t^0}{\partial y^2} = 0.$$

Следовательно, изменение температуры будет только по длине смазочного слоя:

$$\frac{\partial t^0}{\partial x} = \frac{dt^0}{dx} \quad (7)$$

Согласно принятым допущениям, уравнение баланса энергии примет вид:

$$\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = c_0 \rho_0 V_{\text{ск}} \frac{dt^0}{dx}. \quad (8)$$

Если принять $y = h$, где h – толщина смазочного слоя, $u = V_{\text{ск}}$, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (2y - h) + \frac{V_{\text{ск}}}{h} = \frac{1}{2\mu} \left(6\mu V_{\Sigma k} \frac{h - h_0}{h^3} \right) (2y - h) + \frac{V_{\text{ск}}}{h} = \\ = \frac{V_{\text{ск}}}{h} \left[3 \frac{(h - h_0)(2y - h)}{h^2} + \frac{V_{\text{ск}}}{V_{\Sigma k}} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

На основании указанных допущений, после интегрирования $\int_0^h \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy$ и преобразований, согласно [15] предложена формула для определения приращение температуры в смазочном слое:

$$\Delta t^0 = \int_{x_1}^x \frac{2\mu V_{\text{ск}}}{c_0 \rho_0 h_0 h} \left[3 \left(\frac{h - h_0}{h} \right)^2 + \left(\frac{V_{\text{ск}}}{V_{\Sigma k}} \right)^2 \right] dx. \quad (10)$$

На основании полученных экспериментальных данных о реологических характеристиках исследуемого трансмиссионного масла установлена динамика тепловыделения в смазочном слое согласно аналитическим зависимостям по формулам (3–6). При низких скоростях скольжения (до 0,3 м/с), что соответствует проскальзыванию до 10%, тепловыделение в смазочном слое незначительно, максимальные показатели данного параметра составляют 12 Дж/с (рис.3).

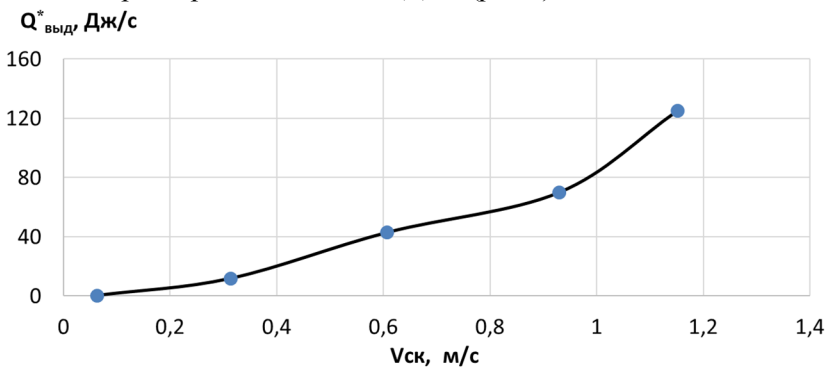


Рис. 3. Зависимость тепловыделения в смазочном слое от величины проскальзывания в условиях качения

При этом максимальное повышение температуры смазочного материала, согласно формуле (10), составило 2 – 3°C. Стремительное увеличение тепловыделения установлено при превышении скорости скольжения 0,6 м/с. Однако, максимальное приращение температуры незначительно и достигает 10° С.

Таким образом, приведенный анализ тепловыделения в смазочном слое по формуле (6) в условиях качения с проскальзыванием показывает, что при гидро- и эластогидродинамическом режиме смазочного действия осуществляется интенсивный теплоотвод, повышение температуры в контакте незначительно. Следовательно, смазочный материал уменьшает потери мощности на трение при наличии эффективного разделяющего смазочного слоя ($h \gg R_a$), что существенно снижает интенсивность тепловыделения в контакте (рис. 1).

При $h \ll R_a$; $h \rightarrow 0$ в условиях полусухого и граничного режимов смазочного действия рассчитать тепловыделение в смазочном слое по формулам (2 – 6) затруднительно. Приращение температуры (по формуле 10) в граничном слое смазочного материала при $h < 0,5$ мкм достигает 400 – 500 °С. На наш взгляд, это достаточно завышенные показатели, поскольку значительно превышают температуру вспышки исследуемого смазочного материала.

Расчет тепловыделения в фрикционном контакте в условиях граничного режима смазочного действия.

При реализации в контакте полусухого и граничного режимов смазочного действия предлагается использовать следующую методику расчета критических температур и исходить из следующих допущений.

При разрушении граничных смазочных слоев возникает локальное приращение температуры на дискретных участках при фрикционном взаимодействии. Исследуемая контактная модель ролик – ролик представляет собой источник теплообразования в виде аддитивной совокупности связанных по линии контакта точечных источников теплообразования. Согласно [13], для условий качения с проскальзыванием интенсивность разогрева опережающей и отстающей поверхностей зависит от суммарных скоростей качения и скорости скольжения. В условиях, близких к заеданию, происходит стремительный прирост температуры отстающего ролика, по сравнению с опережающим, причем скорость приращения температуры зависит от скоростного режима, нагрузки и очень мало от радиуса кривизны.

Величина приращения температуры зависит от отношения скорости движения тел и коэффициента температуропроводности, т.е. от числа Pe . Введем критерий Pe (число Пекле), который характеризует отношение теплосодержания потока осевого направления к тепловому потоку в поперечном направлении и определяется соотношением:

$$Pe = \frac{Vl}{a_t}, \quad (11)$$

где V – скорость, l – длина линии контакта поверхностей, a_t – коэффициент температуропроводности, который определяется отношением:

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (12)$$

где ρ – удельный вес металла, c – удельная теплоемкость металла, λ – коэффициент теплопроводности металла.

Так как в исследуемой контактной модели скорость качения опережающей поверхности постоянна и составляет 2,75 м/с, то скорость движения источника

тепла, согласно критерию Pe , будет определяться скоростью скольжения при наличии проскальзывания контактных поверхностей:

$$\Delta P_e = P_{e1} - P_{e2} = \frac{V_1 l}{a_t} - \frac{V_2 l}{a_t} = \frac{(V_1 - V_2) l}{a_t} = \frac{V_{ск} l}{a_t}. \quad (13)$$

где V_1 , V_2 – скорость качения опережающей и отстающей поверхностей соответственно, $V_{ск}$ – скорость скольжения.

При минимальном исследуемом 3%-ном проскальзывании отстающей поверхности число ΔP_e составляет 2,08. Увеличение степени проскальзывания обуславливает и корреляционное повышение критерия Pe : ΔP_e при проскальзывании 40% составляет 39,93.

Согласно гипотезе, выдвинутой Х.Блоком [16], для каждой пары трибосопряжения и типа смазочного материала существует критическая температура, при превышении которой происходит схватывание либо заедание контактных поверхностей вследствие потерей смазочным материалом его защитных противозносных свойств. При этом критерием оценки условий возникновения заедания является критическая температура в зоне контакта элементов трибосопряжения, которая выражается зависимостью:

$$t_{\Sigma кр} = t_0 + \vartheta, \quad (14)$$

где t_0 – температура поверхностей до входа в зону контакта, ϑ – температура вспышки, которая представляет мгновенное повышение температуры, при которой происходит заедание.

Условие отсутствия заедания выполняется при

$$t_0 + \vartheta \leq t_{\Sigma кр} = const, \quad (15)$$

где t_0 определяется экспериментально, ϑ – расчетным путем.

При условии равенства начальных температур контактных поверхностей, имеющих цилиндрическую форму, мгновенное приращение температуры ϑ определяется по формуле:

$$\vartheta = 0,83 \frac{f N_l V_{ск}}{(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 V_{к1}} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 V_{к2}}) \sqrt{b}}, \quad (16)$$

где f – коэффициент трения, N_l – погонная нагрузка, $V_{ск}$ – скорость скольжения; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности, $\rho_{1,2}$ – удельный вес, $c_{1,2}$ – удельная теплоемкость опережающей (1) и отстающей (2) поверхностей соответственно; b – полуширина площадки контакта по Герцу.

Согласно формуле (16), наибольшее влияние на мгновенное повышение температуры в зоне контакта в условиях нестационарной работы трибозаэлементов оказывает параметр $f N_l V_{ск}$, который характеризует мощность трения и тепловыделение в контакте. При проскальзывании контактных поверхностей до 10% как в условиях обильной подачи смазочного материала в зону трения, так и в условиях масляного голодания локальное повышение температуры незначительно (рис.4). Параметр $t_0 + \vartheta \ll t_{\Sigma кр}$, в связи с этим схватывания контактных поверхностей не установлено.

При дальнейшем увеличении степени проскальзывания, как было проанализировано выше, происходит повышение мощности трения. Локальное приращение температуры увеличивается, в среднем, в 3 и 7 раза при проскальзывании 20 и 40% соответственно в условиях обильной смазки. Однако, достаточное поступление смазочного материала в зону трения создает предпосылки для эффективного теплоотвода.

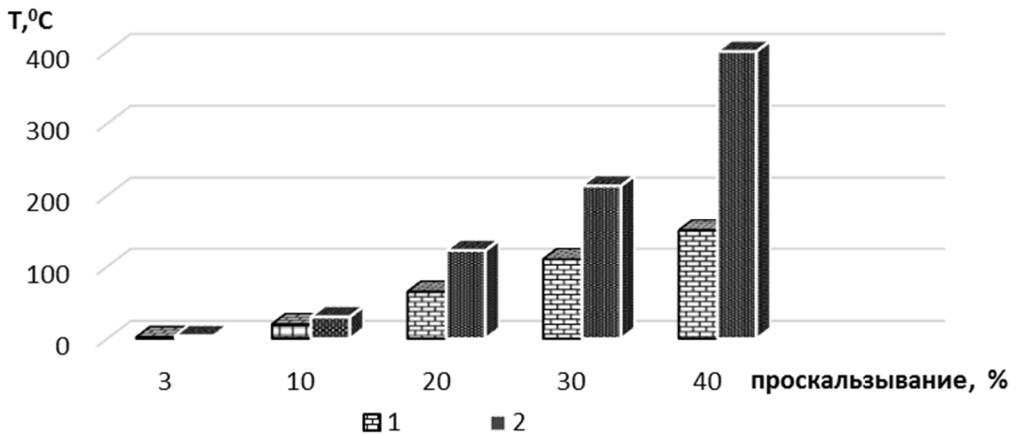


Рис. 4. Локальное повышение температуры в фрикционном контакте: 1 – обильное количество смазочного материала, 2 – масляное голодание

В условиях масляного голодания локальное приращение температуры превышает в 4 (проскальзывание 20%) и 13 раз (проскальзывание 40%) аналогичный параметр при 10%-ом проскальзывании. Первые признаки схватывания контактных поверхностей наблюдаются при локальном приращении температуры до 125°C на 490-ом цикле (проскальзывание 20%) и при локальном приращении температуры до 410°C на 415 цикле (проскальзывание 40%). На основании полученных экспериментальных данных можно оценить температурную стойкость граничных слоев. Она соответствует минимальной температуре $t_{\Sigma_{кр}}$, при которой появляются первые признаки схватывания контактных поверхностей. Для исследуемого смазочного материала данный параметр составляет 145°C.

Выводы:

1. Установлено влияние величины проскальзывания контактных поверхностей на кинетику изменения интенсивности тепловыделения в контакте. Более интенсивное тепловыделение характерно для условий качения с проскальзыванием, превышающим 20%. В условиях прекращения подачи смазочного материала в зону трения наблюдается увеличение интенсивности тепловыделения, в среднем, в 2 раза для пар трения, работающих с проскальзыванием 20 – 40%. Это обусловлено деструкцией граничных пленок смазочного материала, вследствие чего снижается теплоотвод.

2. Проанализирована динамика тепловыделения в смазочном слое с учетом реологических характеристик смазочного материала в контакте. Показана целесообразность выбора различных методик расчета повышения температуры в фрикционном контакте в условиях доминирования гидродинамического, эластогидродинамического и граничного режимов смазочного действия.

Список литературы

1. Rymuza C. Energy concept of the coefficient of friction / C. Rymuza // Wear. – 1996. – Vol. 199. – P. 187–196.
2. Балакин В. А., Тепловыделение и теплоперенос в зоне фрикционного контакта/ В. А. Балакин, Ю. В. Лысенко. // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2001. – № 1. – С.3–7.
3. Балакин В.А. Расчет приращения температуры в ободу колеса железнодорожного подвижного состава / В.А. Балакин, Э.И. Галай //Трение и износ. – 2000. – Т. 21, №3. – С. 269–275.

4. [Balakin V.A.](#) Formation and distribution of heat in the frictional contact zone under conditions of non-stationary heat exchange/ [V.A. Balakin](#) // [Wear.](#) –1981. – [Vol. 72, Issue 2.](#) – P. 133–141.
5. Jahangiri M. Investigation of the Slipping Wear based on the Rate of Entropy Generation / M. Jahangiri // [Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production.](#)–2014. – Vol. 3, No. 1. – P.47–57.
6. An energy-based model for the wear of UHMWPE / R. Colaco, M. P. Gispert, A. P. Serrob, B. Saramago // [Tribol. Lett.](#) – 2007. – Vol. 26. – P. 119-124.
7. Calculation of friction coefficient and temperature field of line contacts lubricated with a non-Newtonian fluid [Electronic resource] / [A. Mihailidis](#), [J. Retzepis](#), [C. Salpistis](#), [K. Panajiotidis](#) // [Wear.](#) – 1999. – Vol. [232, № 2.](#) – P. 213-220.
8. Analytical model for predicting friction in line contacts / Echávarri Otero, J., de la Guerra Ochoa, E., Chacón Tanarro [et al.] // [Lubrication Science.](#) – 2016. – Vol. 28. – P. 189-205.
9. Lee S. C. On the relation of load to average gap in the contact between surfaces with longitudinal roughness / S. C. Lee, H. S. Cheng // [Tribology Trans.](#) – 1992. – Vol. 35, № 3. – P. 523-529.
10. Hsu S. M. Boundary Lubrication and Boundary Lubricating Films. Ch. 12 / Stephen M. Hsu, Richard S. Gates // [Modern Tribology Handbook. Vol. One. Principles of Tribology / Ed.-in-Chief Bharat Bhushan.](#) – CRC Press, 2000. – P. 484-485.
11. [Mechano-chemical model: Reaction temperatures in a concentrated contact](#) / S. M. Hsu, M. C. Shen, E. E. Klaus [et al.] // [Wear.](#) – 1994. – Vol. 175, № 1-2. – P. 209-218.
12. Пат. 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О.О. – № у 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4с.
13. Дроздов Ю. Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Арчegov, В. И. Смирнов. – М.: Наука, 1981. – 275 с.
14. Mikosyanchyk O. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions/ Mikosyanchyk O., Mnatsakanov R., Zaporozhets A., Kostynik R.// [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.](#) – 2016. – 4/1 (82). – pp. 24-31.
15. Жильников Е. П. Основы триботехники: учеб. для вузов / Е. П. Жильников, В. Н. Самсонов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 136 с.
16. Blok H. Seizure-delay method for determining the seizure protection of E.P. lubricants/ H. Blok // [SAE J. \(Trans.\).](#) – 1939. – Vol. 44, № 5. – P. 193.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2017

*О.О.МІКОСЯНЧИК, А. П. КУДРІН, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. С. ЯКОБЧУК,
В.В. ТОКАРУК*

ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ФРИКЦІЙНОМУ КОНТАКТІ ПРИ КОЧЕННІ З ПРОКОВЗУВАННЯМ

Розглянуто вплив швидкості ковзання при коченні з проковзуванням на інтенсивність тепловиділення в локальному контакті в різних режимах мащення. Показана доцільність використання різних методик розрахунку підвищення температури в фрикційному контакті в умовах домінування еластогідродинамічного і граничного режимів мащення. Наведено результати чисельного розрахунку, що показують можливості використаних методик.

Ключові слова: інтенсивність тепловиділення, тепловиділення в змащувальному шарі, критична температура, проковзування, швидкість ковзання.

O. A. MIKOSIANCHYK, A. P. KUDRIN, R. G. MNATSAKANOV, O. Ye YAKOBCHUK, V. V. TOKARUK

ESTIMATION OF HEAT PROCESSES IN THE FRICTION CONTACT UNDER ROLLING WITH SLIPPAGE CONDITION

The influence of slip velocity at rolling with slippage on the intensity of heat release in the local contact at different modes of lubricating action was examined. Method of estimation of temperature resistance of the boundary film of the lubricating material were developed. Efficiency of using different procedures for calculating a temperature increase in the friction contact under conditions of dominating elastohydrodynamic and boundary modes of lubricating action was shown. Results of numerical calculation showing the possibilities of the corresponding methods were presented. The regularities of the heat release in the lubricating layer depending on value of slippage in rolling conditions are established.

Key words: the intensity of heat release, the heat release in lubricant layer, critical temperature, slippage, slip velocity

References

1. Rymuza C. Energy concept of the coefficient of friction / C. Rymuza // *Wear*. – 1996. – Vol. 199. – P. 187-196.
2. Balakin V. A., Teplovydelenie i teploperenos v zone frikcionnogo kontakta/ V. A. Balakin, Ju. V. Lysenok // *Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo*. – 2001. – № 1. – S.3-7
3. Balakin V.A. Raschet prirashhenija temperatury v obode koleasa zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava / V.A. Balakin, Je.I. Galaj // *Trenie i iznos*. – 2000. – T. 21, №3. – S. 269-275.
4. Balakin V.A. Formation and distribution of heat in the frictional contact zone under conditions of non-stationary heat exchange/ V.A. Balakin // *Wear*. –1981. – Vol. 72, Issue 2. – P. 133–141.
5. Jahangiri M. Investigation of the Slipping Wear based on the Rate of Entropy Generation / M. Jahangiri // *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P.47–57.
6. An energy-based model for the wear of UHMWPE / R. Colaco, M. P. Gispert, A. P. Serrob, B. Saramago // *Tribol. Lett.* – 2007. – Vol. 26. – P. 119-124.
7. Calculation of friction coefficient and temperature field of line contacts lubricated with a non-Newtonian fluid [Electronic resource] / A. Mihailidis, J. Retzepis, C. Salpistis, K. Panajiotidis // *Wear*. – 1999. – Vol. 232, № 2. – P. 213-220.
8. Analytical model for predicting friction in line contacts / Echávarri Otero, J., de la Guerra Ochoa, E., Chacón Tanarro [et al.] // *Lubrication Science*. – 2016. – Vol. 28. – P. 189-205.
9. Lee S. C. On the relation of load to average gap in the contact between surfaces with longitudinal roughness / S. C. Lee, H. S. Cheng // *Tribology Trans.* – 1992. – Vol. 35, № 3. – P. 523-529.
10. Hsu S. M. Boundary Lubrication and Boundary Lubricating Films. Ch. 12 / Stephen M. Hsu, Richard S. Gates // *Modern Tribology Handbook. Vol. One. Principles of Tribology / Ed.-in-Chief Bharat Bhushan*. – CRC Press, 2000. – 1760p. – P. 484-485.
11. Mechano-chemical model: Reaction temperatures in a concentrated contact / S. M. Hsu, M. C. Shen, E. E. Klaus [et al.] // *Wear*. – 1994. – Vol. 175, № 1-2. – P. 209-218.
12. Pat. 88748, Ukraine, MPK G01N 3/56. Prystryi dlya otsinky trybotekhnichnykh kharakterystyk tryboelementiv / Mikosyanchyk O. O.; zayavnyk ta patentovlasnyk Mikosyanchyk O.O. – # u 2013 13450; zayavl. 19.11.2013; opubl. 25.03.2014, Byul. # 6. – 4s.
13. Drozdov Ju. N. Protivozadirnaja stojkost' trushhihsja tel / Ju. N. Drozdov, V. G. Archegov, V. I. Smirnov. – M.: Nauka, 1981. – 275 c.
14. Mikosyanchyk O. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions/ Mikosyanchyk O., Mnatsakanov R.,

Zaporozhets A., Kostynik R.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 4/1 (82). – pp. 24-31.

15. Zhil'nikov E. P. Osnovy tribotehniki: ucheb. dlja vuzov / E. P. Zhil'nikov, V. N. Samsonov. – Samara: Izd-vo Samar. gos. ajerokosm. un-ta, 2012. – 136 s.

16. Blok H. Seizure-delay method for determining the seizure protection of E.P. lubricants/ H. Blok // SAE J. (Trans.). – 1939. – Vol. 44, № 5. – P. 193.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: oksana.mikos@ukr.net.

Кудрін Анатолій Павлович – канд. техн. наук, професор, професор кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56, E-mail: mnatsakanov@ukr.net.

Якобчук Олександр Євгенійович – старший викладач кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58.

Токарук Віталій Володимирович - старший викладач кафедри технології виробництва та відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58.