

Assessment of Thermal Potential in Disc Brake of Transportation Unit

**M.Y. Javadov¹, B.V. Dolishniy², V.S. Skrypnyk², D.Y. Zhuravlev²,
M.M. Nasirova³, N.A. Volchenko⁴, L.B. Malyk²**

¹ *Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

² *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)*

³ *National Aviation Academy of Azerbaijan (Mardakan ave, 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

⁴ *Kuban State Technological University (Moskovskaya st., 2, Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)*

For correspondence:

Nasirova Mahluga / e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

Abstract

Potentials and their gradients are analyzed in mechanical, heat, chemical, electrical, magnetic fields arising during elektrothermomechanical interaction of friction pairs of disc-block tormos of vehicles. Influence of diffusion and adsorption potentials on formation of double electric layers on friction belts of solid disks during braking is shown. The effect of local thermal potential on the friction layer of the solid brake disc is considered from the point of view of obtaining excessive entropy. Stable state of elementary volume of disk friction belt layer is estimated through local functionals, which take into account fluctuation of its energy load.

Keywords: *paint and varnish coating, substrate, regular microrelief, shrinkage, shrinkage stress, internal stress, curing, polyester urethane varnish, thin film.*

DOI: 10.52171/2076-0515_2021_13_02_27_39

For citation:

Javadov M.Y., Dolishniy B.V., Skrypnyk V.S., Zhuravlev D.Y., Nasirova M.M., Volchenko N.A., Malyk L.B.
[Assessment of Thermal Potential in Disc Brake of Transportation Unit]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2021. Vol. 13, № 2. Pp. 27–39 (in Russian).

Nəqliyyat vasitələrinin bütöv diskində termiki potensialın qiymətləndirilməsi məsələsi

M.Y. Cavadov¹, B.V. Dolişniy², V.S. Skripnik², D.Y. Juravlyov²,
M.M. Nəsirova³, N.A. Volçenko⁴, L.B. Malik²

¹ Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr., 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

² Ivano-Frankivsk Neft və Qaz Milli Texniki Universiteti (Karpatska 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukrayna)

³ Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr., 30, Bakı şəh., AZ1010, Azərbaycan)

⁴ Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

Yazışma üçün:

Nəsirova Məhlugə / e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

Annotasiya

Nəqliyyat vasitələrinin diskli-kündəli əyləclərinin sürtünmə cütünün elektrotermomexaniki qarşılıqlı təsiri zamanı yaranan (əmələ gələn) mexaniki, istilik, kimyəvi, elektrik, maqnit sahələrindəki potensiallar və onların qradientləri təhlil olunub. Əyləc prosesi zamanı bütöv diskərin sürtünmə yolunda ikili elektrik qatın formalaşmasına difuziya və adsorbsiya potensialının təsiri göstərilib. Lokal termiki potensialın bütöv əyləc diskinin sürtünmə qatına təsiri izafi entropiyanın əldə edilməsi baxımından nəzərdən keçirilib. Diskin sürtünmə yolunun elementar həcmnin sabit vəziyyəti, enerji yüklənməsinin fluktuasiyası nəzərə alınaraq lokal funksionallar vasitəsilə qiymətləndirilib.

Açar sözlər: diskli-kündəli əyləc, bütöv disk, sürtünmə cütü, sürtünmə yolu, potensial və onun qradienti, lokal termiki potensial.

DOI: 10.52171/2076-0515_2021_13_02_27_39

УДК: 669.113.592.117

Оценка термического потенциала в сплошном диске тормоза транспортного средства

М.Я. Джавадов¹, Б.В. Долишний², В.С. Скрыпник², Д.Ю. Журавлев²,
М.М. Насирова³, Н.А. Вольченко⁴, Л.Б. Малык²

¹ Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр., 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

² Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

³ Национальная академия авиации Азербайджана (Мардакянский пр., 30, Баку, AZ1010, Азербайджан)

⁴ Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, д. 2, корп. А, Краснодар, 350072, Россия)

Для переписки:

Насирова Махлуга / e-mail: mahluga.nasirova@gmail.com

Аннотация

Проанализированы существующие методы определения внутренних (остаточных, усадочных) напряжений, возникающих при отверждении тонких плёнок лакокрасочных покрытий (ЛКП), основанные на консольном изгибе подложки и разности толщин мокрого и сухого покрытия соответственно. Отмечена зависимость их точности от соотношения толщин плёнка/подложка и однородности нанесённой плёнки. Рассмотрено применение методов атомно-силовой микроскопии, основанных на измерении геометрии регулярного микрорельефа (РМР) поверхности плёнки, служащего в качестве характерного проявления её усадочных деформаций. Расчет внутренних напряжений и деформаций проведен на основе стохастического подхода с учетом «шахматного» распределения деформационных дефектов на наружной поверхности пленки.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, подложка, регулярный микрорельеф, усадка, усадочные напряжения, внутренние напряжения, отверждение, полиэфируретановый лак, тонкая плёнка.

Введение

Пары трения тормозных устройств являются одним из основных узлов тормозных систем автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта. Детали пар трения тормозов должны обеспечивать безопасность перевозимых пассажиров и грузов, надежность и стабильность при длительных сроках эксплуатации, высокие трибологические характеристики материалов пар трения при динамический и тепловой нагруженности и не зависеть от температурных и погодных условий, обеспечивать малошумность и комфорт от процесса фрикционного взаимодействия пар трения тормозов и т. д. Перечисленные требования определяются комплексом физико-механических, а также трибологических характеристик материалов фрикционной пары.

Движущей силой в механическом, тепловом, химическом, электрическом и магнитном поле процессов, эффектов и явлений являются потенциалы их параметров.

Анализ литературных источников и состояние проблемы

В работах [1, 2, 3] обращено внимание на действие потенциалов и их градиентов, которые наблюдались в механических, тепловых, химических, электрических, электромагнитных и других полях. Однако как потенциалы так и их градиенты рассматриваются отвлеченно и не привязанные к телам, которые применяются в дисково-колодочных тормозах. Короче говоря, требуется систематизировать потенциалы и их градиенты применительно к парам трения тормозных устройств.

Электрические явления на поверхностях раздела фаз рассмотрены в работе [4].

При этом отмечено, что вблизи поверхности раздела фаз образуется двойной слой зарядов: одна часть этого слоя локализована на плоскости поверхности, а вторая в виде диффузионного слоя распространяется вглубь раствора.

На микроуровне роль диффузии в процессах трения и износа значительно многообразней [5]. Предположение о возможности диффузии ионов металла высказывались давно. Растворение металла в полимерном материале было экспериментально обнаружено В. А. Белым. В результате этих исследований было установлено, что в адгезионных соединениях, содержащих по меньшей мере два разнородных металла, полимер обладает способностью проявлять свойства электролита при крекинг процессе его поверхностного слоя.

Кроме того предполагалось, что это связано с диффузией металлосодержащих продуктов контактных реакций в полимерную подложку. При этом на подложке возникает электрическое напряжение. При замыкании во внешней цепи появляется ток, направление которого определяется величиной и знаком электрохимических потенциалов металлов, составляющих данную пару. Электрохимическое взаимодействие оказывает влияние на адгезионную прочность.

Диффузия в равномерно вращающихся системах представлена в работе [5]. В такой системе различные компоненты жидкости подвержены действию центробежной и кориолисовой сил, которые обусловлены вращением системы. Рассмотрено условие, когда диффузионные потоки и термодинамические силы одновременно равны нулю. Этот случай имеет практическое значение при определении количества жидкости

по седиментации в ультрацентрифуге. Здесь же приводится метод определения скорости седиментации жидкости между раствором и чистым растворителем. Предложенные методы можно использовать в системах охлаждения, заполненных наножидкостью, самовентилируемых дисках с шипами в дисково-колодочных тормозах транспортных средств.

Цель работы – обосновать возникновение потенциалов, действующих в полях пар трения тормозов и выделить роль локального термического потенциала в сплошном диске тормоза.

Потенциалы – движущая сила процессов, эффектов и явлений

Чтобы выяснить смысл понятия потенциал, будем рассматривать каждый вид энергии как произведение двух величин:

- фактора интенсивности (интенсивного свойства);
- фактора емкости (экстенсивного свойства).

Так, механическая энергия определяется величиной $f dl$, т. е. произведением силы на приращение пути; электрическая — Edq , т.е. произведением э. д. с. на количество переносимого заряда; магнитная — Bdl , т.е. произведением магнитной индукции на намагниченность, «объемная» — PdV , поверхностная энергия — $\sigma d\omega$, т. е. произведением поверхностного натяжения на изменение площади поверхности, потенциальная — $mgdh$, кинетическая — $(V^2/2)dm$ и т. д.; наконец, химическая — μdn^* . Факторы интенсивности нередко объединяют под общим названием обобщенных сил, а фактор емкости называют обобщенным путем. Так, в случае механической энергии величина силы является множителем напряже-

ния (так же, как P , σ , μ и т. д. в соответствующих видах энергии), а величина пройденного пути, т. е. соответственно V , ω , n и т. д. показывают, в какой степени проявляется действие силы.

Каждому виду энергии, возникающей при фрикционном взаимодействии пар трения тормозов соответствуют определенные потенциалы и их градиенты, которые зависят от темпов протекания процессов (см. рис. 1).

При этом между термодинамическими и энергетическими параметрами при их постоянных величинах существуют соотношения [6] (см. табл. 1).

В табл. 1 использованы следующие условные обозначения: $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$ - изо-

барный коэффициент расширения;

$\beta = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$ - изотермический коэффици-

ент сжатия; c_p , c_v – теплоемкость при постоянном давлении, объеме.

При электротермомеханическом трении в зонах фрикционного контакта происходит множество процессов, эффектов и явлений, которые пересекаются между собой, воздействующих на трибологические характеристики узлов трения. Но среди них имеются такие, которые влияют на несколько характеристик. В первую очередь, к такого рода явлению относится диффузия.

Влияние диффузии на процессы трения и износа можно рассматривать как на макро, так и на микроуровне. Макроуровень определяет влияние диффузии на трибологические характеристики узла трения с позиций термодинамической системы открытого типа. Для последней возможно наличие режимов, в которых происходит отрицательный прирост энтропии и, следова-

тельно, снижение деструктивных процессов. Уменьшение энтропии и выход термодинамической системы на благоприятные режимы развития тем вероятнее, чем интенсивней будет происходить энергетический обмен с токами омывающей среды. Наиболее мощным каналом такого обмена (диссипации) является массоперенос, т. е. диффузия, способствующая терморозряду, а потом термовзрыву, т. е. глубинному пиролизу в полимерной накладке [7, 8]. Применительно к узлам трения это означает, что диффузия ускоряет переход трибосопряжения к трению с максимальными значениями динамического коэффициента трения и минимальным износом.

Диффузионный слой, имея внешний и внутренний слой, способствует формированию двойного электрического слоя. При этом первый, находящийся в растворе на твердой подложке накладки соответствует плотному или адсорбированному, а второй – диффузионному слою.

Подобно тому, как температура является движущей силой при возникающих потенциалах (см. рис. 1), а также в теплообменных процессах, так и химический потенциал является движущей силой при переходе массы.

Он приводит к установлению химического равновесия (и фазового, если передача массы происходит в гетерогенной системе, т. е. между фазами). Подобно другим факторам интенсивности (в соответствующих процессах), химический потенциал вещества по мере протекания процесса выравнивается и в момент наступления равновесия он становится одинаковым во всех существующих фазах, в которых находится данное вещество.

Таким образом, химической переменной является количество вещества. Избыток вещества как бы компенсирует меньшую силу его химического сродства. Под веществом подразумевается поверхностный слой накладки, находящийся при поверхностной температуре выше допустимой для его материалов.

В отличие от других факторов интенсивности, непосредственно измерить химический потенциал нельзя, что делает это понятие не таким наглядным, как удельные нагрузки, поверхностные, объемные и вспышки температуры и другие в металлополимерных парах трения дисковоколодочного тормоза транспортного средства.

Локальный термический потенциал в сплошном диске тормоза

Совместное действие излучения, теплопроводности, свободной и вынужденной конвекции с помощью неоднородной среды направлено на снижение энергонагруженности пар трения дисково-колодочных тормозов при их фрикционном взаимодействии в интервале времени между торможениями при движениях транспортного средства по полотну дороги.

Теплота подводится к полированным (пояса трения) и матовым поверхностям тормозного диска и к его телу посредством теплопроводности, а отводится она совместным действием свободной и вынужденной конвекции, а также излучением от указанных выше поверхностей. Природа перечисленных видов теплообменных процессов различная, и следовательно, эффективность охлаждения неодинаковая.

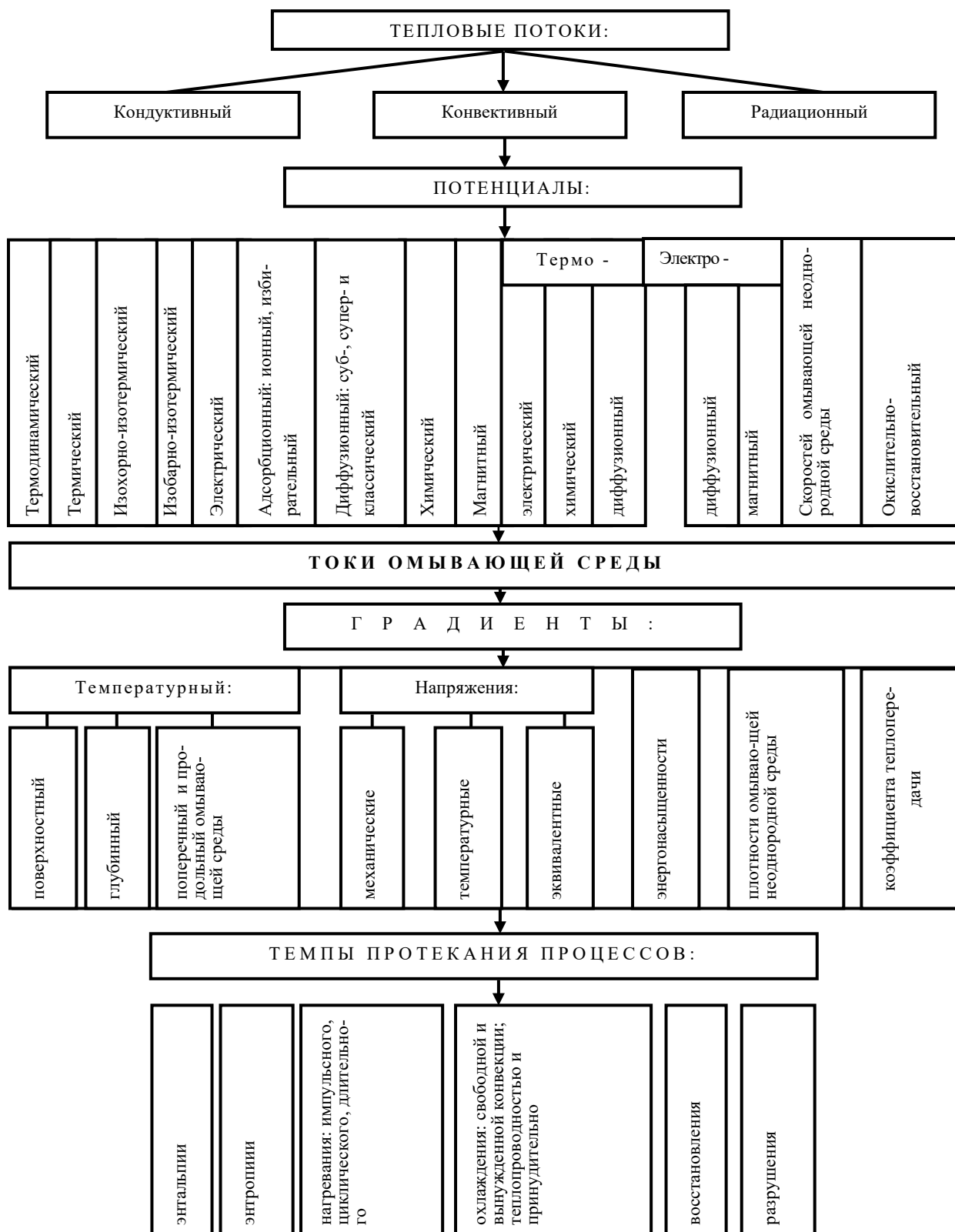


Рисунок 1 - Иерархические энергетические уровни трибосопряжений

Figure 1 - Hierarchical energy levels of tribocoupling

Таблица 1. Соотношения между термодинамическими и энергетическими параметрами при их постоянных величинах

Table 1. Relationships between thermodynamic and energetic parameters at their constant values

Изменение:		$P=\text{const}$		$T=\text{const}$	$V=\text{const}$	$S=\text{const}$	$U=\text{const}$	$H=\text{const}$	$F=\text{const}$	$G=\text{const}$
давления (МПа)		(∂P)	-	-1	$-\alpha V$	$-C_p/T$	$\alpha PV-C_p$	$-C_p$	$S+\alpha PV$	S
температуры (°C)		(∂T)	1	-	$-\beta V$	$-\alpha V$	$(\beta P-\alpha T)-V$	$(1-\alpha T)V$	βPV	V
объема (м ³ /моль)		(∂V)	αV	βV	-	$C_v\beta V/T$	$C_i\beta V$	$(C_i\beta+\alpha V)V$	$-\beta SV$	$(\alpha V-\beta S)V$
энтропии Дж/(моль·°C)		(∂S)	C_p/T	αV	$-C_v\beta V/T$	-	$C_v\beta PV/T$	$C_p V/T$	$(C_v\beta P-\alpha TS)V/T$	$(C_p-\alpha TS)V/T$
теплоты	Однakoвая единица измерения, Дж/моль	(∂Q)	C_p	αTV_1	$-C_v\beta V$	0	$-C_i\beta PV$	$C_p V$	$(C_v\beta P-\alpha TS)V$	$(C_p-\alpha TS)V$
работы системы		(∂A)	αPV	βPV	0	$C_v\beta PV/T$	$C_v\beta PV$	$(C_v\beta+\alpha V)PV$	$-\beta SPV$	$(\alpha V-\beta S)PV$
внутренней энергии		(∂U)	$C_p-\alpha PV$	$(\alpha T-\beta P)V$	$-C_v\beta V$	$-C_v\beta PV/T$	-	$(C_p-\alpha PV)V- C_i\beta PV$	$(\beta SP-\alpha TS+ C_v\beta P)V$	$V(C_p-\alpha PV)-(\alpha TV-\beta PV)S$
энтальпии		(∂H)	C_p	$(\alpha T-1)V$	$-(C_v\beta+\alpha V)V$	$C_p V/T$	$C_v\beta PV- (C_p-\alpha PV)V$	-	$(S+\alpha PV)x x(V-\alpha TV)+ C_p\beta PV$	$(C_p+S-\alpha NS)V$
энергии Гельмгольца		(∂F)	$-(S+\alpha PV)$	$-\beta PV$	Изохорно-изотермический потенциал					$SV(\beta P-1)-\alpha PV$
				βSV	$(\alpha TS- C_v\beta P)V/T$	$(-C_v\beta P+ \alpha TS- \beta SP)V$	$(S-\alpha PV)x x(\alpha TV-V)- C_p\beta PV$	-		
энергии Гиббса	Однakoвая единица измерения, Дж/моль	(∂G)	$-S$	$-V$	Изобарно-изотермический потенциал					-
					$(\beta S-\alpha V)V$	$(\alpha TS- C_p)V/T$	$V(\alpha PV-C_p)+ (\alpha TV- \beta PV)S$	$(\alpha TS-C_p-S)V$	$SV(1-\beta P)+ \alpha PV^2$	

На рис. 2 а, б, в проиллюстрирована имитационная схема вращения колеса легкового (а) и грузового (б) транспортного средства при фрикционном взаимодействии пар трения дисково-колодочного тормоза при различных коэффициентах взаимного перекрытия Квз и объемной температуре (в) на: 1, 2, 3 и 4-ом положении накладки на поясе трения тормозного диска. Как видно из рис. 2 в движущей силой являлся градиент объемной температуры, т. е. ее разности: $t_{1'} - t_1$; $t_{2'} - t_{1'}$ и $t_{3'} - t_{2'}$.

На рис. 3 а, б, в показано температурное поле сплошного тормозного диска при граничных условиях: а – несимметричных 3-го рода; б – разнородных; в – изолированного с одной стороны слоем воды; q –

удельный тепловой поток; t_i – температуры поверхностей диска; α_i – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; c , ρ – теплоемкость и плотность материала диска.

Слой воды на поверхности диска (рис. 3 в) экранирует лучистый теплообмен. Из рис. 3 а, б, в следует, что основную роль в доставке теплового потока от одной поверхности к другой принадлежит теплопроводности (кондуктивному теплообмену).

Рассмотрим уравнение баланса в слое поясе трения диска при его фрикционном взаимодействии с рабочей поверхностью полимерной накладки

$$\rho \partial_t \epsilon = -q_{ij}, \quad (1)$$

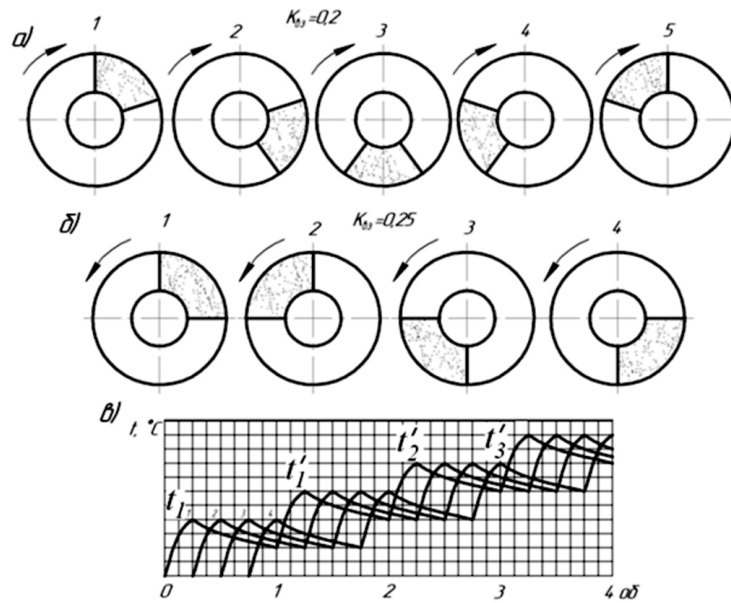


Рисунок 2 а, б, в - Имитация вращения колеса при фрикционном взаимодействии пар трения дисково-колодочного тормоза при различных коэффициентах взаимного перекрытия $K_{вз}$ (а, б) и объемной температуре (в) на: 1, 2, 3 и 4-ом положении накладке на поясе трения тормозного диска

Figure 2 a, b, c - Simulation of wheel rotation at friction interaction of disc-shoe brake triangle pairs at different coefficients of mutual overlap K_{vz} (a, b) and volume temperature (c) on: 1, 2, 3 and 4-th position of lining on friction belt of brake disc

где ρ – плотность материала; e – внутренняя энергия на единицу массы материала; q_{ij} – тепловой поток, генерируемый в слое пояса трения диска при первом обороте колеса транспортного средства (рис. 3 а).

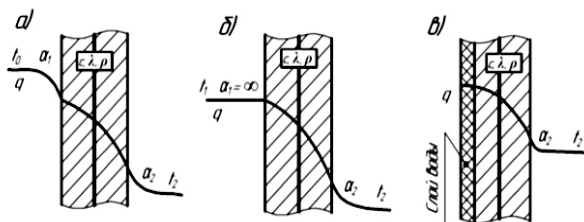


Рисунок 3 а, б, в - Температурное поле тормозного диска при граничных условиях: а – несимметричных 3-го рода; б – разнородных; в – изолированного с одной стороны слоем воды

Figure 3 a, b, v - Brake disc temperature field under boundary conditions: a - asymmetric of the 3rd kind; b - heterogeneous; c - insulated on one side water layer

Умножим обе части равенства (1) на δt^{-1} (δ – символ варьирования объемной температурой t) и проинтегрируем по всему объему слоя V пояса трения диска для фиксированных граничных условий получаем равенство

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e \partial V = \int q_j \delta t_j^{-1} dV \quad (2)$$

или с учетом закона Фурье ($q = -\lambda \text{grad} t$) имеем

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e \partial V = \frac{1}{2} \int \lambda t^2 \delta (t_j^{-1})^2 dV, \quad (3)$$

Представим, что вблизи стабильного состояния элементарного объема dV слоя пояса трения диска, характеризуемого объемной температурой $t_0(x_j)$, имеем

$$\partial_t e = \partial_t \delta e \quad (4)$$

и если пренебречь членами более высокого порядка, то получаем

$$\lambda t^2 = \lambda_0 t_0^2 + \delta(\lambda t^2). \quad (5)$$

В свою очередь равенство (3) записываем в виде

$$\int \rho \delta t^{-1} \partial_t e \delta V = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 \delta(t_j^{-1})^2 dV + \frac{1}{2} \int \delta(\lambda t^2) \delta(t_j^{-1})^2 dV + \frac{1}{2} \int \delta(\lambda t_j^{-1})^2 dV. \quad (6)$$

Согласно [9, 10] левая часть (6) равна $\frac{1}{2} \partial_t \delta^2 S$. Следовательно, правая часть соответствует получению избыточной энтропии (S), поскольку пояс трения диска прошел путь второго оборота колеса транспортного средства (рис. 3 б). При этом полученная избыточная энтропия положительна, поскольку имеет место прирост тепловой энергии в слое пояса трения диска, за счет увеличения работы трения и удельных нагрузок во фрикционном узле.

Определение стабильного термического состояния пояса трения сплошного диска тормоза

В окрестности стабильного состояния элементарного объема dV слоя пояса трения диска обе части (1) – величины первого порядка. Таким образом, уравнение (6) устанавливает взаимосвязь между величинами второго порядка и поэтому вторым членом в правой части (6) нельзя пренебречь по сравнению с первым. По той же причине знак одного первого члена не определяется условием устойчивости, поскольку темп нагревания слоя пояса трения диска не равен его темпу вынужденному воздушному охлаждению (см. рис. 4 а, б). Исследуем знак первого члена отдельно. Для этого введем следующее обозначение:

$$\Phi(t, t_0) = \int L(t, t_0) dV, \quad (7)$$

где подынтегральное выражение – лагранжиан (L)

$$\int \alpha(t, t_0) dV = \frac{1}{2} \lambda_0 t_0^2 (t_j^{-1})^2; \quad (8)$$

тогда первый член в (6) равен $\delta\Phi$. Величина Φ является функционалом двух переменных: неварьируемой переменной t_0 – предлагаемого решения (оно еще будет определено) – и переменной t , которая варьируется. Ниже будет показано, что t можно интерпретировать как флуктуирующее температурное распределение, среднее от которого равно t_0 .

Исследуем теперь условие, при котором интеграл Φ стабилен (экстремален) по отношению к вариациям t . Эта классическая задача вариационного исчисления [9,10]. Условие стабильности описывается равенством Эйлера – Лагранжа [7]:

$$\frac{\delta L}{\delta t^{-1}} = -(\lambda_0 t_0^2 t_j^{-1})_j = 0. \quad (9)$$

При этом считаем, что решение $t^+(x_j)$ того уравнения совпадает с предполагаемым решением t_0 . Это а posteriori приводит к дополнительному условию:

$$t^+ = t_0, \quad (10)$$

подставляя которое в (9), получаем экстремаль

$$\left(\frac{\delta L}{\delta t^{-1}} \right)_{t_0} = (\lambda_0 t_0^2 t_j^{-1})_j = 0, \quad (11)$$

т. е. уравнение теплопроводности, отвечающее стабильному тепловому состоянию.

Таким образом, подынтегральное выражение (8) функционала (Φ) (7) можно интерпретировать как обобщенный лагранжиан. Исследуем природу этого экстремума. Для этого вычисляем $\Phi(t, t_0)$ вблизи стабильного состояния элементарного объема dV слоя пояса трения диска получаем

$$\Delta\Phi = \Phi(t, t_0) - \Phi(t_0) = \\ = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 \left\{ \left[t_0^{-1} + \theta \right]_{,j}^2 - \left[t_{0,j}^{-1} \right]^2 \right\} dV \left(\theta = t^{-1} - t_0^{-1} \right) \quad (12)$$

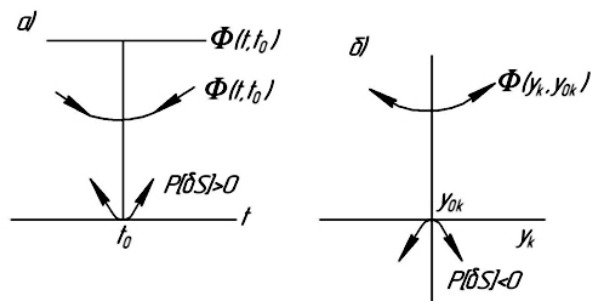


Рисунок 4 а, б - Локальный потенциал $\Phi(t, t_0)$ и, функционал $F(t, t_0)$ для устойчивого (а) и локальный потенциал $\Phi(y_k, y_{0k})$ для неустойчивого (б) решения задачи теплопроводности: $P[S]$ – образующаяся энтропия

Figure 4 a, b - Local potential $F(t, t_0)$ and, functional $F(t, t_0)$ for stable (a) and local potential for unstable (b) solution of heat supply problem: $P[S]$ - resulting entropy

Раскрывая скобки в правой части (12) и интегрируя по частям линейный по θ (температурное возмущение вызванное перемещением пояса трения диска за третий оборот колеса транспортного средства) (рис. 2 в) члену, увидим, что этот член равен нулю благодаря (11). Следовательно вблизи стабильного состояния

$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} \int \lambda_0 t_0^2 (\theta_{,j})^2 dV > 0. \quad (13)$$

Поэтому экстремум Φ соответствует абсолютному минимуму. Функционалы, обладающие свойствами (11) и (13) называются локальными потенциалами (локальными по отношению к функции t_0). С другой стороны, из (13) следует, что первый член в правой части (6) положителен.

Вообще функционал типа $\Phi(y_k, y_{k_0})$ от нескольких функций y_k ($k = 1, 2, \dots$) называют локальным потенциалом, если выполняются следующие условия:

- первого порядка для минимума Φ по отношению к

$$y_k \delta\Phi = 0 \quad (14)$$

совместно с дополнительными

$$y_k^+ = y_{0k} \quad (15)$$

что не противоречат законам сохранения для y_k ;

- более высокого порядка

$$\Delta\Phi > 0 \quad (16)$$

для абсолютного минимума всегда выполняемо.

Отметим, что условие высокого порядка, менее жесткое, чем условие (16)

$$\Delta\Phi = \frac{1}{2} \delta^2 \Phi > 0 \quad (17)$$

не подходит, так как пользоваться локальным потенциалом применительно к вариационному исчислению значит пользоваться пробными функциями, соответствующими произвольным отклонением неизвестного решения. Например, по определению функционал

$$F(t, t_0) = \int q_{0j} t_j^{-1} dV = \int \lambda_0 t_0^2 t_{0,j}^{-1} t_j^{-1} dV \quad (18)$$

удовлетворяет первому, но не удовлетворяет второму условию и поэтому его нельзя рассматривать как локальный потенциал.

В самом деле, интегрирование по частям позволяет получить $\Delta F = 0$ вблизи стабильного состояния, а не условие минимума (рис. 4 а).

Кроме того, в задаче теплопроводности знак $\Delta\Phi$ в (10) совпадает со знаком (6), так как условие устойчивости здесь выполнено. Но этого уже не будет в задачах, допускающих неустойчивое решение. Такая ситуация представлена на рис. 4 б где функционалы изображены как обычные функции термического процесса. В устойчивом состоянии локальный потенциал всегда имеет

минимальное значение в случае полного прогрева или термостабилизационного состояния пояса трения диска, и поэтому любое его изменение приводит к положительной величине получаемой избыточной энтропии.

В данной задаче локальный потенциал далеко не единственный, и тем же способом, используя ранее рассмотренные множители, можно построить несколько лагранжианов. Например, в задаче теплопроводности, кроме лагранжиана (8), можно рассмотреть следующие выражения:

$$\frac{1}{2} \lambda_0 t_0 \left[(\ln t)_{,j} \right]^2 \text{ или } \frac{1}{2} \lambda_0 t_{,j}^2 \quad (19)$$

Для этого (1) надо умножить на $t \delta t^{-1}$ или δt . Как правило, наиболее подходящий для практических целей локальный потенциал связан с характером термического закона. Например, в данном случае лагранжиан (8) более удобен, если $\lambda_0 t_0^2$ почти не изменяется, тогда как второй лагранжиан (19) подходит для случая $\lambda_0 = \text{const}$.

Проанализируем вариационные уравнения (9) и (11). Как уже отмечалось характерной особенностью локального потенциала $\Phi(t, t_0)$ (7) является то, что он зависит от двух функций t и t_0 . Вместе с тем из выражения (8) следует, что

$$2\Phi(t, t_0) = P(t), \quad (20)$$

где правая часть означает получение энтропии $P[S]$. В частных случаях, когда $\lambda \sim t^{-2}$ или когда λ и t можно считать константами (как в случае стабильных состояний), Φ не зависит от t_0 , а зависит только от t и тогда совпадает с получением энтропии $P[S]$ [11].

Чтобы наглядно представить свойства функционала Φ по отношению к функциям t и t_0 , рассмотрим поведение одной функции Φ двух переменных t и t_0 (рис. 5).

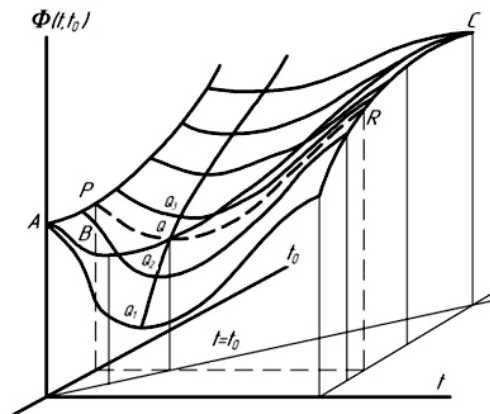


Рисунок 5 - Локальный потенциал $\Phi(t, t_0)$ как функция флуктуирующей температуры t и температуры стабильного состояния t_0

Figure 5 - Local potential $F(t, t_0)$ as a function of fluctuating temperature t and stable temperature t_0

Сечение ABC поверхности Φ плоскостью $t = t_0$ является графиком функции $\Phi(t, t_0)$, которая, согласно зависимости (20), равна половине получаемой энтропии. Если соблюдена теорема о минимуме полученной энтропии, то точка B на кривой ABC отвечает стабильному состоянию системы. Но независимо от этой теоремы $\Phi(t, t_0)$ известно, что функция t всегда имеет минимум при неизменном значении t_0 в стабильном состоянии (см. кривую PQR). Другими словами, этот минимум относится к классу функций, которые можно рассматривать как возмущения данного стабильного состояния (например, при импульсном подводе теплового потока к слою пояса трения диска за четвертый оборот колеса транспортного средства (рис. 2 в)). Именно поэтому необходим функционал от двух температурных распределений t и t_0 . Уравнение (11) нельзя интерпретировать как выражение вариационного принципа в обычном смысле, так как t_0 в лагранжиане является лишь параметром. Гораздо целесообразней

рассматривать уравнения (10) и (11) как некое вариационное свойство, которому должно удовлетворять любое стабильное распределение $t_0(x_j)$. Это означает, что, если $\Phi(t, t_0)$ заменить t_0 некоторым другим стабильным распределением, решение уравнения (9), реализующее минимум Φ , даст значение t^+ величины t , отличное от t_0 . Это происходит, например, в точках Q_1 , Q_2 и Q_3 , на рис. 5 которые не лежат в секущей плоскости $t = t_0$. Наоборот, минимум, соответствующий точке Q , лежит в плоскости $t = t_0$ и описывает истинно стабильное состояние. Однако эту точку не следует путать с точкой B - минимумом образования энтропии. Так как t^+ - функционал заданного стабильного распределения, дополнительное условие (10) записываем в виде

$$t^+(\{t_0\}) = t_0, \quad (21)$$

позволяющем дать физическую интерпретацию метода локального потенциала. Так t^+ , являясь решением вариационной задачи, соответствует нулевому значению вариации δt и, следовательно, нулевому значению положительно определенной формы $-\delta^2 S$. Согласно формуле Эйнштейна существует простое соотношение между вероятностью флуктуации и $\delta^2 S$. Наиболее вероятное состояние соответствует $\delta^2 S = 0$. Поэтому и решение t^+ соответствует наиболее вероятному распределению объемных температур (по сравнению с другими распределениями, допустимыми при малых флуктуациях). С другой стороны, $t_0(x_j)$ - макроскопическое решение, т. е. среднее температурное распределение, которое означает что t_0 учитывает влияние флуктуации произвольной величины. Поэтому физический смысл дополнительного условия (21) заключается в том, что наиболее вероятное распределение

объемных температур (по отношению к малым флуктуациям) должно совпадать со средним распределением (по отношению ко всем флуктуациям вообще).

Заключение

Представленные энергетические уровни трибосопряжений (см. рис. 1) не дают полной картины о существующих потенциалах. К последним еще необходимо отнести: нормальный, течения, кинетический, седиментационный (являются потенциалами межфазной границы); гальвани и дзета, которые являются внутренними потенциалами жидкостного слоя и другие. Необходимо отметить, что явление термодиффузии сопровождается эффектами Соре (движение потока жидкости при наличие градиента температуры) и Дюфора (обратное явление, состоящее в появлении теплового потока при наличие градиента концентраций). При этом явление диффузии зависит от коэффициентов диффузии и подвижности диффузионного потока. Большинство потенциалов принимают активное участие в формировании двойных электрических слоев.

Установлено, что чем выше концентрация жидкости (электролита), тем быстрее падает потенциал с расстоянием, поскольку κ возрастает ($1/\kappa$ равно расстоянию, на котором потенциал в e раз меньше его значения на поверхности). При данной эквивалентной концентрации толщина двойного слоя уменьшается с увеличением его валентности. Соотношение между поверхностной плотностью заряда и потенциалом поверхности показывает, что при низких значениях последнего эти две величины пропорциональны друг к другу и, таким образом, двойной слой ведет себя подобно конденсатору с постоянной емкостью. Кон-

центрация электролита и его валентность влияют как на заряд, так и на потенциал.

Из других потенциалов необходимо отметить: локальные в кинетической теории; локальный для: стационарного состояния; временных процессов; уменьшение локального потенциала в исследовании устойчивости трибосопряжения при омывании воздушными токами с поперечными и продольными температурными градиентами.

Оперируя в задачах теплопроводности, применительно к сплошному диску тормоза, приращением локального потенциала и его избыточным состоянием позволяет ввести новый блуждающий локальный потенциал. Последний будет иметь положительные и отрицательные значения для процессов нагревания и охлаждения пояса трения диска тормоза транспортного средства.

REFERENCES

1. **Kragelskij I.V.** Trenie i iznos / I.V. Kragelskij // M.: Mashinostroyeniye, 1968. – 480 s. (in Russia)
2. **Glensdorf P.** Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustojchivosti i flukta-cij / P. Glensdorf, I. Prigozhin // M.: Mir, 1973yu – 269 s. (in Russia)
3. **Lyubimov D.I.** Fiziko-mekhanicheskie processy pri trenii / D.I. Lyubimov, V.A. Ryzhikov // Novocherkassk: Yu-RGTU, 2003. – 142 s. (in Russia)
4. **Adamson A.** Fizicheskaya himiya poverhnostej / A. Adamson. – M.: Mir, 1979. – 583 s. (in Russia)
5. **De Groot S.** Neravnovesnaya termodinamika / S. De Groot, P. Mazur // M.: Mir, 1964. – 452 s. (in Russia)
6. **Yaroslavcev A.B.** Osnovy fizicheskoy himii. M.: Nauchnyj mir, 2000. – 230 s. (in Russia)
7. Tribologiya: trenie, iznos, smazka / A.Kh. Janahmadov, A.I. Volchenko, K.T. Nabizade [i dr.] // Baku: Apostroff-A, 2019. – 640s. (in Russia)
8. **Garkunov D.N.** Tribotekhnika: uchenik dlya vuzov. D.N. Garkunov // 2-e izd. pere-rab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 328 s. (in Russia)
9. Diskovye i diskovo-kolodochnye tormoza v mashinostroyenii. Tom 1 / A.Kh. Janahmadov, D.A. Volchenko, M.Ya. Javadov, i dr. – Baku «Apostrof - A», 2020. – 376 s. Kulik, V. I. Study of tribological properties of composite materials with a silicon carbide matrix / V. I. Kulik, A. S. Nilov, A. P. Garshin, V. V. Savich, A. A. Dmitrovich, D. I. Saroka // Refractories and Industrial Ceramics. – 2012. – Vol. 53, №4. – P. 259–268. (in Russia)
10. **Langhof, N.** The effect of residual silicon in CMC brake pads on friction and wear / N. Langhof, R. Voigt, H. Mucha, W. Krenkel // Proc. 6th European Conference on Braking JEF 2010, Lille, France, 2010. – P. 71–78.
11. **Li, Zh.** Preparation and properties of C/C–SiC brake composites fabricated by warm compacted – in situ reaction / Zh. Li, P. Xiao, X. Xiong // International journal of minerals, metallurgy and materials. – 2010. – Vol. 17, №4. – P. 500–505.

Поступило в редакцию:	01.09.2020
После доработки:	08.06.2021
Принято к публикации:	12.06.2021