

УДК 541.11/123(075.8)

## ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПАРАХ ТРЕНИЯ ПРИ КРЕКИНГ-ПРОЦЕССЕ

(часть II)

А.Х. ДЖАНАХМЕДОВ<sup>1+</sup>, А.И. ВОЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>, В.С. СКРЫПНИК<sup>2</sup>,  
А.С. ЕВЧЕНКО<sup>2</sup>, В.Н. ВОЛЬЧЕНКО<sup>3</sup>

---

В статье дан анализ и синтез термоэлектрических процессов, характеризующих электротермомеханические фрикционные взаимодействия пар трения тормозных устройств. Выделен верхний слой полимерной накладки при температурах выше допустимой для ее материала, когда наступает крекинг-процесс.

Рассмотрены термокинетические модели взаимодействия металлического элемента трения при его работе в различных средах. Установлено влияние поверхностных и объемных температур, удельных нагрузок, коэффициента взаимного перекрытия пар трения, соотношения между количеством реагентов, присутствия инертных газов и типа реакций на скорость протекания химических реакций при крекинг-процессе в верхнем слое полимерных накладок узлов трения тормозных устройств. Показано, что при оценке равновесия химической реакции необходимо учитывать изменение энергии Гиббса.

*Ключевые слова:* пара трения, верхний слой накладки, крекинг-процесс, химический потенциал, компоненты фрикционного материала, энергия Гиббса.

---

**Введение.** В трибологии сформулировали три последовательных и взаимосвязанных процесса трения, а именно: фрикционное взаимодействие микровыступов трущихся поверхностей, изменение свойств поверхностных и приповерхностных слоев в результате взаимодействия и разрушение поверхностей вследствие двух предыдущих этапов. Эти этапы трения происходят в следующих полях: механическом, электрическом и электромагнитном. Движущей силой является окислительно-восстановительный потенциал с его градиентами. Его величина оценивается для полимерного элемента трения в продольном и поперечном направлениях. Для потоков омывающей среды учитывается поперечный температурный градиент (определяется отношением  $C_p/C_u$ : теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме).

Любое стабильное структурно-фазовое состояние существует короткий период времени, переходя к новому уровню нестабильности вследствие процессов, явлений и эффектов, увеличивающих общую энтропию и, соответственно, уменьшающих свободную энергию материалов. В результате провоцируется следующий переход в новое квазистабильное состояние. При этом процесс продолжается в течение некоторого времени, определяющегося физико-химическими особенностями соответствующих преобразований, а также возможностью создавать условия, при которых эти переходы будут происходить с как можно меньшей периодичностью.

---

<sup>1</sup> Азербайджанская Национальная академия авиации

<sup>2</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (г. Ивано-Франковск, Украина)

<sup>3</sup> Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар, Россия)

+ Janahmadov Ahad Khanahmed oglu, E-mail: dzhanakhmedov@yahoo.com

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Свободная энергия химических реакций связана с электродвижущей силой. Основным условием протекания реакции в верхнем слое полимерной накладки всегда является положительная разность между потенциалом окислителя и восстановителя [1, 2]. Простое вычисление стандартной разности потенциалов, как в случае других термодинамических параметров, не всегда позволяет с полной уверенностью предсказать возможность химического взаимодействия при электротермомеханическом трении в сопряженных парах. Надо учитывать еще и кинетические факторы. Например, алюминий (Al) и хром (Cr) должны были бы интенсивно окисляться кислородом воздуха и взаимодействовать с водой. В случае алюминия этого не наблюдается ввиду образования окисной пленки, а в случае хрома еще и вследствие значительного перенапряжения (это как бы эквивалент энергии активации для электрохимических процессов), необходимого для его окисления.

Другим важным фактором является необходимость учитывать концентрацию ионов в растворе, способствующих протеканию реакций взаимодействия до некоторого положения, определяемого условием равенства окислительно-восстановительных потенциалов. В этом случае необходимо определять константу равновесия.

Значительная часть элементов периодической системы может существовать в нескольких степенях окисления. При этом в зависимости от партнера по окислительно-восстановительному процессу и некоторых других условий (чаще всего величины рН раствора) они могут отдавать или принимать различное количество электронов. Предположим, что некоторый элемент может иметь 6 различных степеней окисления. Тогда для описания стандартных потенциалов всех возможных переходов в системе потребуется 15 уравнений [3]. Поскольку большинство таких процессов в верхнем слое полимерной накладки имеют разные потенциалы в кислой и щелочной средах, их число удвоится. Используют некоторые упрощенные методики представления стандартных потенциалов окислительно-восстановительных реакций, существенно облегчающие их систематизацию. Наиболее распространенной формой является диаграмма Латимера, описывающая потенциалы превращения между накладками: последовательными степенями окисления.

Динамическая нагруженность пятен контактов микровыступов пар трения трибосистемы зависит от ее основных эксплуатационных параметров (удельных нагрузок, коэффициентов взаимного перекрытия, поверхностной и объемной температуры) [4,5,6], а также от типа химических реакций.

**Постановка задачи.** В статье рассмотрены термокинетические модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении в различных средах и влияние различных факторов на интенсивность крекинг-процесса в рабочих слоях полимерных накладок.

**Цель работы** – обосновать степень влияния различных факторов на интенсивность крекинг-процесса в паре трения «металл-полимер».

**Термокинетические модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении в различных средах.** Работа, совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от расположения диполя (рис. 1) относительно воображаемой электронейтральной плоскости.

Электрон совершает работу по преодолению полного или половины потенциала адсорбированного слоя. Надо учитывать и тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки при выгорании связующих компонентов материала молекулы образовавшегося электролита сильно ориентированы. В результате их эффективный дипольный момент увеличивается по отношению к дипольному моменту поверхности металлического элемента трения. Это является одним из основных

условий инверсии множества микротоков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического элемента трения. Из этого следует, что трибохимия занимает важное место в трибологии пар трения тормозных устройств (рис.2).

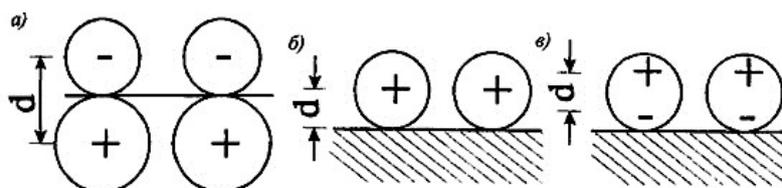


Рис. 1 а, б, в. Диполи, возникающие при адсорбировании на поверхности металла:

а, б – хемосорбция: ковалентная; ионная; в – физическая сорбция;  
d – расстояние между центрами зарядов

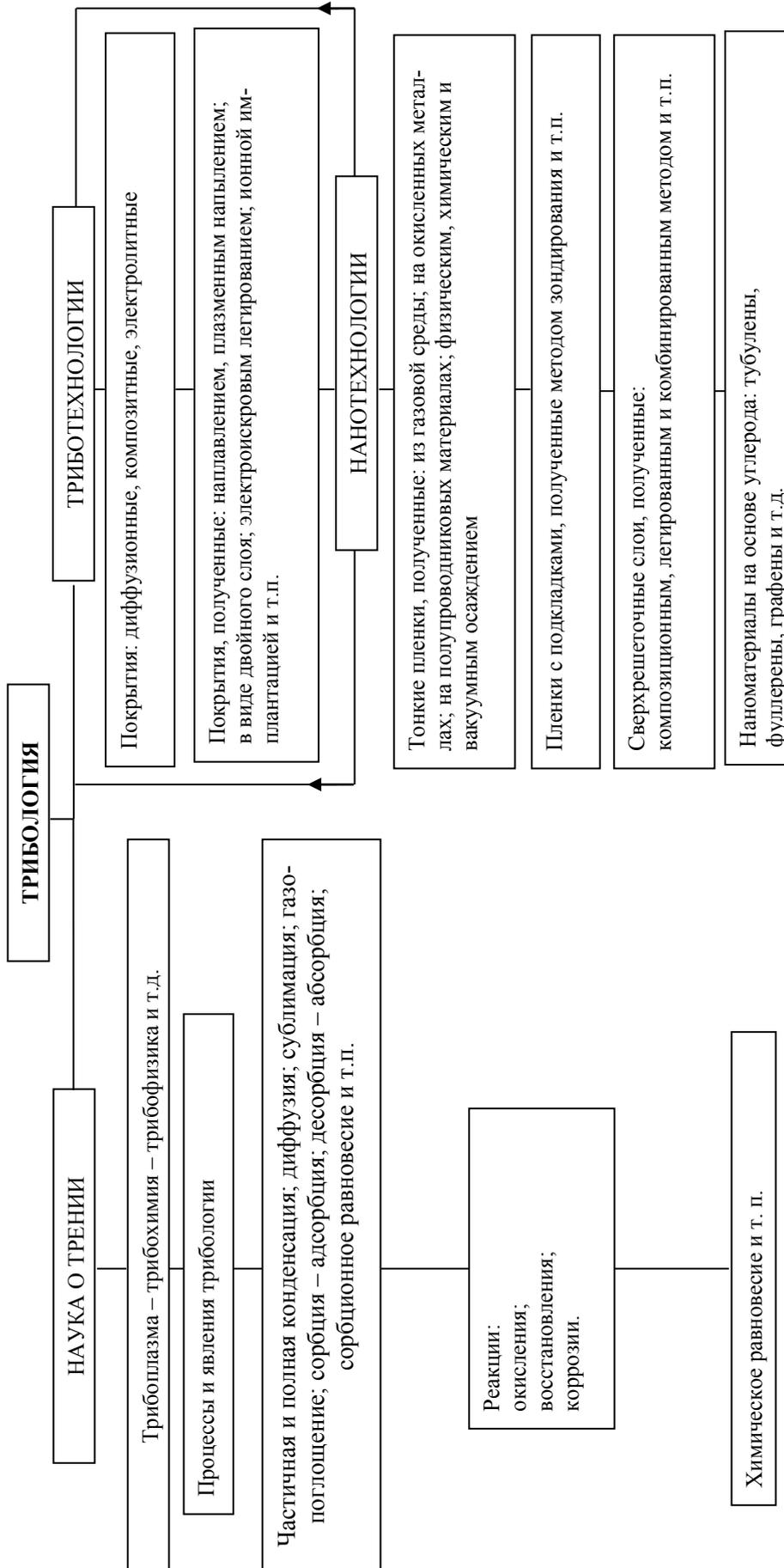


Рис. 2 Место трибохимии в трибологии пар трения тормозных устройств

Оценим адекватность трибокинетической модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении в газовой фазе.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, происходящих в слое микронеровностей рабочей поверхности металлического элемента трения под действием упругих или пластических деформаций, например, при торможении в присутствии газовой среды.

На рис. 3 использованы следующие обозначения: I - химическая реакция  $\text{CO}_2 + \text{M} = \text{MO} + \text{CO}$ ; II - химическая реакция  $\text{CO} + \text{M} = \text{C} + \text{MO}$ ; III - каналы в микровыступах; штриховкой показан поверхностный слой, нарушенный вследствие трения скольжения; стрелкой вверх на границе раздела обозначена трибодесорбция; стрелкой вниз - трибоабсорбция, двойные стрелки - трибодиффузия; газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического элемента трения путем диффузии, а затем абсорбируется.

Трибоабсорбция происходит по точкам приложения сил трения. В зависимости от условий контактирования пар трения тормозного устройства и их теплового состояния в процессе торможения происходит трибоабсорбция в трибоплазме из газовой фазы наряду с трибохимической реакцией или с адсорбцией и реакцией газа на рабочей поверхности металлического элемента трения. Трибоадсорбированный газ адсорбируется металлом, и только после этого с ним происходят химические превращения. Наряду с этим трибоабсорбированный газ на микроучастках контактирования переносится в их приповерхностные слои (трибодиффузия), в которых химическая реакция в значительной степени определяется процессами трибосорбции и диффузии [3]. В случае, когда скорость трибосорбции и трибореакции одного порядка, реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического элемента трения. При этом необходимо обратить внимание на трибоиндукционные процессы, которые очень часто существенно отличаются от соответствующих термоиндукционных процессов. Поэтому константы, характеризующие интенсивность абсорбции и диффузии при термоактивации, нельзя использовать для трибокинетических аналитических зависимостей.

Представление пар трения тормозных устройств в виде конденсатора с наличием дифференциальных емкостей дает возможность объяснить многие эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. На поверхности раздела могут присутствовать химически адсорбированные ионы, в данном случае анионы, которые имеют тот же знак, что и рабочая поверхность металлического элемента трения. Данные анионы дегидратированы, через их центры проходит внутренняя плоскость Гельмгольца. Слой Штерна образуется, главным образом, за счет электростатически адсорбированных катионов, через центры которых проходит внешняя плоскость Гельмгольца. При этом большая часть поверхности раздела занята молекулами воды. На сильно заряженной

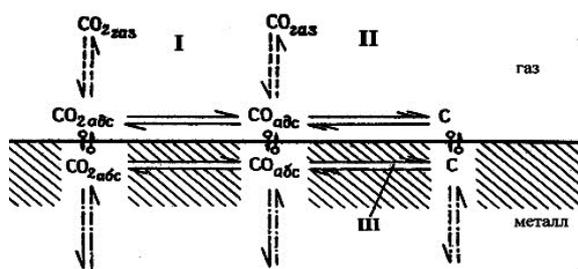


Рис. 3 Трибокинетическая модель трибосорбции и трибореакции в системе « $\text{CO}_2$ -металл»;  $\text{CO}_{2\text{газ}}$  -  $\text{CO}_2$  в газовой фазе;  $\text{CO}_{2\text{адс}}$  -  $\text{CO}_2$  в адсорбированном состоянии;  $\text{CO}_{2\text{абс}}$  -  $\text{CO}_2$  в абсорбированной форме, те же индексы для CO

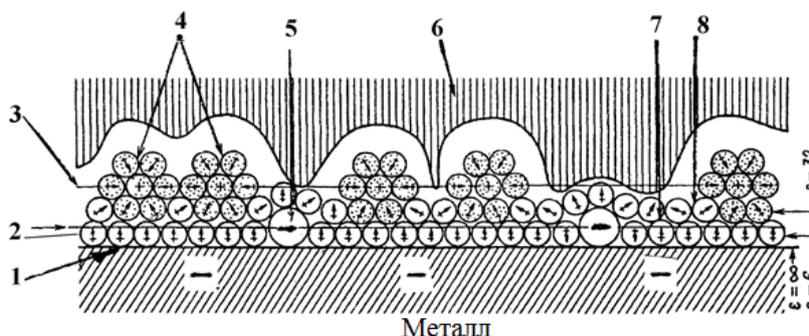


Рис. 4 Детальная модель двойного слоя в паре «металл-вода»: 1 - поверхность металла с потенциалом  $\phi_M$ ; 2, 3 - плоскости Гельмгольца и Гуи с потенциалами  $\phi_1$  и  $\phi_2$ ; 4 - сольватированные катионы; 5 - специфические адсорбированные анионы; 6 - нормальная структура воды ( $\epsilon = 78,5$ ) 7, 8 - слои воды: первый ( $\epsilon = 6$ ); второй ( $\epsilon = 32$ );  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость воды

поверхности раздела концентрация адсорбированных ионов весьма мала, поскольку один ион приходится на площадь порядка  $\sim 10 \text{ \AA}^2$ . Особенности структуры двойного слоя приведены на рис. 4. Представленная схема составлена для случая, когда металлический элемент трения находится в статике. В динамике все происходит иначе [7-9].

При торможении дискретное множество микроконтактного взаимодействия поверхностей «вращающийся металлический элемент – неподвижная фрикционная накладка» при различных их тепловых состояниях будут вносить существенные изменения в рассмотренную ранее схему. А именно: происходит реполяризация ионов и катионов; изменяется положение плоскостей Гельмгольца (внутренняя плоскость становится внешней и наоборот); существенно изменяются электрические свойства ионов и катионов; поверхность жидкости становится неоднородной, поскольку ее структуру нарушают адсорбционные частицы материала накладки. Кроме того, и другие составляющие вносят изменения в указанные выше процессы и явления.

#### **Влияние различных факторов на крекинг-процесс в верхних слоях фрикционных накладок**

Проанализируем влияние различных факторов на скорость протекания химических реакций при крекинг-процессе, происходящем в поверхностных слоях полимерных накладок узлов трения тормозных устройств. Из факторов выделим: поверхностную и объемную температуры, удельные нагрузки, коэффициент взаимного перекрытия пар трения, соотношение между количеством реагентов, присутствие инертных газов и тип реакции [10].

Повышение поверхностной температуры пары трения «металл-полимер» увеличивает выход продуктов эндотермических реакций. Чем интенсивнее изменение энтропии ( $\Delta H$ ) верхнего слоя полимерной накладки, тем скорее растет константа равновесия с ростом температуры и, следовательно, выход продуктов реакции. Реакция при электротермомеханическом трении сопровождается выделением теплоты, температура при этом падает. В связи с этим в соответствии с принципом подвижного равновесия Вант-Гоффа происходит упругопластическая деформация микровыступов металлического фрикционного элемента. Снижение поверхностной температуры пары трения благоприятствует прохождению экзотермической реакции (в частности, диссоциации). При увеличении удельных нагрузок  $p$  в паре трения, температура  $T$  возрастает, состав равновесной системы изменяется, а вместе с ней изменяется и коэффициент  $K_p$  ( $K_p = \varphi(t, p)$ ).

В соответствии с уравнением  $\Delta G = \Delta T - T\Delta S$  (где  $\Delta G$  – изменение энергии Гиббса;  $T$  – температура;  $\Delta S$  – изменение энтропии) судить о влиянии температуры можно и по знаку  $\Delta S$ : при  $\Delta S > 0$  нагревание благоприятствует процессу, при  $\Delta S < 0$  – наоборот. Оба критерия ( $\Delta H$  и  $\Delta S$ ) приводят к аналогичным результатам, так как речь идет о влиянии  $T$  на термодинамическое равновесие трибосистемы, когда  $\Delta G = 0$ . При  $T \neq 0$  справедливо равенство  $\Delta H = T\Delta S$ . Знак выражения  $\Delta S(\Delta H)$  определяет направление смещения равновесия, его абсолютная величина  $\Delta S(\Delta H)$  – степень его смещения. Нередко легче ориентироваться на  $\Delta S$ , чем на  $\Delta H$ , так как знак  $\Delta S$  часто определить проще, чем знак  $\Delta H$ .

Характер влияния давления на равновесный выход в соответствии с зависимостью, приведенной в [11], определяется знаком разности числа молей газообразных реагентов  $\Delta n$  и зависимостью  $K_p$  от давления.

Если абсолютное значение  $\Delta n$  велико, то решающее значение имеет первый фактор; при  $\Delta n > 0$  увеличение давления неблагоприятно сказывается на интенсивности выхода продуктов реакции, при  $\Delta n < 0$  – благоприятно. При крекинге верхнего слоя полимерной накладки увеличение давления приводит к уменьшению выхода газообразных продуктов, в том числе ненасыщенных углеводородов, соединяющихся с водородом. При  $\Delta n = 0$  влияние давления на термодинамическое равновесие определяется только зависимостью  $K_p$  от давления, причем установить ее в общем виде не предоставляется возможным. Однако совершенно очевидно, что влияние давления на  $K_p$  существенно только при высоких давлениях, когда различие в сжимаемости разных газов становится более значительным.

При  $\Delta n = 0$  изменение давления смещает равновесие. Но это кажущееся противоречие принципу Ле-Шателье, так как влияние давления определяется знаком изменения объема. При низких давлениях знаки  $\Delta V$  и  $\Delta n$  совпадают, при высоких давлениях  $\Delta V \neq 0$  (с этой возможностью

приходится считаться и в тех случаях, когда абсолютная величина  $\Delta n$  невелика). Например, если для реакции  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  (г) при  $T = 900^\circ\text{C}$

$$(K_\gamma)_{p=1} = \frac{\gamma_{\text{CO}}\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{CO}_2}\gamma_{\text{H}_2}} = \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot 1} = 1,0;$$

то

$$(K_\gamma)_{p=50} = \frac{1,26 \cdot 0,76}{1,15 \cdot 1,12} = 0,74,$$

т.е. равновесие реакции смещается в сторону образования  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (г) (смещение за счет конденсации пара исключено, так как  $(T_{\text{крH}_2\text{O}}) < 900^\circ\text{C}$ ).

Влияние  $P$  на  $\gamma_i$  иногда приходится учитывать и при незначительных давлениях, особенно если реакция протекает без изменения объема в начале электротермомеханического фрикционного взаимодействия микровыступов пар трения. В этом случае изменение выхода может быть вызвано сравнительно небольшим изменением  $p$ .

Расчет такого равновесия следует проводить тщательнее, чем для случаев с  $\Delta n \neq 0$ , когда путем незначительного изменения давления легко сдвинуть равновесие в желательном направлении и тем самым «исправить» вычисления.

Изменение степени дисперсности и компактности фаз в верхнем слое полимерной накладки оказывает существенное влияние на химическую активность его веществ. Поэтому при расчете равновесия реакций, в которых участвуют мелкокристаллические, аморфные и стеклообразные вещества, необходимо учитывать дополнительное изменение энергии Гиббса  $dG_{\text{пов}} = \sum d(\sigma_i \omega_i)$  (где  $\sigma_i$  – поверхностное натяжение боковых поверхностей микровыступов пар трения;  $\omega_i$  –  $i$ -я термодинамическая вероятность), и равновесие отвечает условию  $dG + dG_{\text{пов}} = 0$  (где  $dG$  – изменение энергии Гиббса без учета рассматриваемого фактора).

Так как поверхностное натяжение в ходе реакции можно считать постоянным, изменение энергии Гиббса, вызванное варьированием величины всех поверхностей раздела микровыступов, равно:

$$\Delta G_{\text{пов}} = \sum \sigma_i \Delta \omega_i = \Delta H_{\text{пов}} - T \Delta S_{\text{пов}} = RT \ln(K_a / K_a^{\cdot}),$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $K_a, K_a^{\cdot}$  – константа химического равновесия и ее значения с учетом влияния поверхностной энергии;  $\Delta H_{\text{пов}}$  и  $\Delta S_{\text{пов}}$  – изменение энтальпии и энтропии единицы площади поверхности, отнесенной к одному молю данной фазы.

Для получения максимального выхода продуктов реакции с верхнего слоя накладки при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии с металлическим элементом трения нужна стехиометрическая смесь исходных веществ. Для достижения максимальной степени протекания реакции превращения необходим избыток исходных веществ. Поэтому если расход одного из них по эксплуатационным соображениям ограничен, то возрастание исходной концентрации других реагентов увеличивает число молей образующихся продуктов и тем самым степень протекания реакции. При этом следует учитывать легкость удаления из полученной смеси непрореагировавшего избытка реагентов из межконтактного зазора пар трения за счет омывания их потоками циркулирующего воздуха.

Увеличения степени превращения можно также добиться, если удалять из одной зоны продукты реакции, связывая их в малодиссоциируемые, труднорастворимые или нелетучие вещества. Подобный подход достаточно рационален ввиду того, что отпадает необходимость в большом избытке реагента. Так, если при образовании  $\text{CO}_2$  без изменения парциального давления паров воды, находящихся между микровыступами межконтактного зазора пар трения, то с уменьшением концентрации этого газа смесь обогатится водородом [5].

Наличие продуктов реакции в исходной смеси приводит к уменьшению степени превращения верхнего слоя полимерной накладки.

Рассмотрим влияние инертных газов ( $\text{Ar}$  – аргона,  $\text{Ne}$  – неона,  $\text{He}$  – гелия,  $\text{Kr}$  – криптона,  $\text{Xe}$  – ксенона,  $\text{Rn}$  – родона) [5] в начале и в конце электротермомеханического трения, когда на

некоторое время можно считать, что удельные нагрузки в паре трения постоянны ( $p=\text{const}$ ). Инертные газы выполняют роль разбавителя других газов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) в начале торможения, находящихся в межконтактном зазоре. К концу торможения межконтактный зазор уменьшается, поскольку увеличивается удельная нагрузка, и эффект разбавления инертными газами снижается. Хорошим средством удаления инертных газов из межконтактного зазора является продувка его воздухом окружающей среды.

Следовательно, для химических реакций крекинга верхнего слоя полимерной накладки, протекающих с уменьшением объема выделяющихся газов, эффект разбавления инертными газами нежелателен. При возрастании объема смеси, разбавленной инертными газами, увеличивается степень протекания реакции.

**Обсуждение результатов исследований.** Движущей силой эндо- и экзотермических химических реакций, происходящих в верхнем слое полимерной накладки, а также окислительно-восстановительных процессов на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения являются химические потенциалы, возникающие при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии рабочей поверхности металлического элемента трения с верхним слоем электролита и нижнего слоя электролита с поверхностью кювета накладки.

Результаты исследований позволили установить и прогнозировать следующее: образующиеся в электролите электроны сильно ориентированы и их эффективный дипольный момент велик, что ведет к инверсии множества токов по схеме «полимер-металл»; трибоадсорбированный газ адсорбируется рабочей поверхностью металла, после чего происходят его химические превращения; при скорости трибосорбции и трибореакции одного порядка химическая реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического элемента трения; изменение степени дисперсности и компактности фаз, возникающих в верхнем слое полимерной накладки, содержащих аморфные и стекловидные вещества, существенно влияет на их химическую активность; при этом необходимо учитывать изменение энергии Гиббса; изменение энергии Гиббса поверхностного слоя полимерной накладки связано с его температурой и теплосодержанием, которые влияют на направление смещения равновесия химической реакции.

**Заключение.** В результате исследования термокинетического взаимодействия пятен контактов микровыступов рабочих поверхностей при трении в различных средах и влияния различных факторов на крекинг-процесс в верхних слоях фрикционных накладок установлено следующее:

- эффекты ионной адсорбции существенно различаются при чисто электростатической или так называемой специфической (обусловленной ковалентным взаимодействием с металлом) адсорбции. Ее предельным случаем является адсорбция с полным переносом заряда и переходом иона в состав атома;

- увеличение поверхностной температуры способствует росту объема выхода продуктов эндотермических реакций из верхнего слоя полимерной накладки, а также константы равновесия, что сопровождается выделением теплоты. При этом в соответствии с принципом подвижного равновесия Вант-Гоффа происходит упруго-пластическая деформация микровыступов рабочей поверхности металлического элемента трения. Снижение поверхностной температуры пар трения способствует интенсификации экзотермической реакции с диссоциацией ионов поверхностного слоя полимерной накладки;

- увеличение удельных нагрузок в паре трения приводит к уменьшению выхода газообразных продуктов, в том числе ненасыщенных углеводородов, соединяющихся с водородом, из их межконтактного зазора; при этом удельные нагрузки в парах трения напрямую зависят от их коэффициента взаимного перекрытия;

- для достижения максимальной степени протекания реакции превращения необходим избыток исходных веществ; при этом если расход одного из них по эксплуатационным соображениям ограничен, то возрастание исходной концентрации других реагентов увеличивает число молей образующихся продуктов и тем самым степень протекания реакции.

## REFERENCES

1. Yaroslavcev A.B. Osnovy fizicheskoy himii. M.: Nauchnyy mir, 2000. – 230 s.
2. Kragelski I. V. Treniye i iznos. M.: Mashinostroenie. 1968.
3. Prigozhin I. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovyh dvigatelej do dissipativnyh struktur: Per. s angl. Y.A. Danilova i V.V. Belogo / I. Prigozhin, D. Kandeludi. – M.: Mir, 2002. – 461 s.
4. Myshkin N.K. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovec. – M.: Fizmatizdat, 2007. – 368 s.
5. Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Volchenko N.A. i dr. Tribologiya: treniye, iznos, smazka. – Baku: «Apostrof-A», 2019. – 640 s.
6. Kindrachuk M.V. Polymeric Materials Modified by Semiconductor Substances in Friction Units of Braking Devices / Kindrachuk M.V., Volchenko O.I., Volchenko D.O., Volchenko N.O., Polyakov P.O., Kornienko A.O., Yurchuk A.O. // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – Vol. 11. №3, 2019. – P. 03014-1 – 03014- 8.
7. Kindrachuk, M. Polymeres with enhanced energy capacity modified by semiconductor materials / M. Kindrachuk, A. Volchenko, D. Volchenko, O. Tisov, A. Kornienk. *Functional Materials*, 2019.
8. Volchenko, N.A. Electrochemistry with double electrical layers in frictional interaction metal-polymer tribolink/Volchenko, N.A., Krasin, P.S., Volchenko, D.A., Voznyi, A.V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
9. Volchenko A.I. Nano-tribological processes at electric discharge of discrete ohmic contacts of metal-polymer pairs / A.I. Volchenko, A.Kh. Janahmadov, E.S. Pirverdiev. *Science&Applied Engineering quarterly*. - London, UK, 2016. - №10. - P.16-21.
10. Janahmadov A.Kh., Volchenko A.I., Volchenko D.A., Popovich V.Y., Evchenko A.S. Elektrottermomehanicheskoe frikcionnoe vzaimodejstvie v parah treniya pri kreking-processe (chast I) // *Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii*, 2020, T.12, № 3. – S. 15-23.
11. Prikladnaya elektrohimiya. Izd. 2-e, per. i dop. Pod red. N.T. Kudryavceva. – M.: Himiya, 1975. – 552 s.

## KREKİŇQ-PROSESİ ZAMANI SÜRTÜNME CÜTLƏRİNDƏ ELEKTROTTERMOMEXANİKİ FRIKSİON QARŞILIQLI ƏLAQƏ (II hissə)

Ə.X. CANƏHMƏDOV, D.A. VOLÇENKO, V.S. SKRIPNİK, A.S. YEVÇENKO, V.N. VOLÇENKO

Məqalə əyləc qurğularının sürtünmə cütlərinin elektrottermomexaniki friksion qarşılıqlı əlaqəsini xarakterizə edən termoelektrik proseslərin analizinə və sintezinə həsr edilib. Eyni zamanda, krekinq proses başlayan anda polimer kündənin materialı üçün buraxıla bilən yüksək temperaturda onun üst təbəqəsinin ayrılması müəyyən olunub.

Sürtünmə zamanı metal elementinin müxtəlif mühitlərdə işləməsi, onun qarşılıqlı əlaqəsinin termokinetik modelləri nəzərdən keçirilib. Əyləc qurğusunun sürtünmə vahidlərinin polimer kündələrinin üst təbəqəsində krekinq-proses zamanı kimyəvi reaksiyaların baş vermə sürətinə səthi və həcmi temperaturlarının, xüsusi yüklərin, reaktivlərin miqdarı arasındakı nisbət, təsirsiz qazların mövcud olmasının və reaksiyaların növünün təsiri təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, kimyəvi reaksiyanın tarazlığının qiymətləndirilməsi zamanı Gibbs enerjisinin dəyişməsinə nəzərə almaq lazımdır.

*Açar sözlər:* sürtünmə cütü, kündənin üst təbəqəsi, krekinq-prosesi, kimyəvi potensial, friksion materialların komponentləri, Gibbs enerjisi.

## ELECTROTHERMOMECHANICAL FRICTIONAL INTERACTION IN CRACKING FRICTION PAIRS (Part II)

A.Kh. JANAHMADOV, D.A. VOLCHENKO, V.S. SKRYPNİK, A.S. EVCHENKO, V.N. VOLCHENKO

The article examines the analysis and synthesis of thermoelectric processes characterizing electrothermomechanical friction interactions of friction pairs of brake devices. In this case, the upper layer of the polymer patch is isolated at temperatures higher than permissible for its material when the cracking process occurs.

Thermokinetic models of interaction of metallic element of friction during its operation in different media are considered. Influence of surface and volume temperatures, specific loads, coefficient of mutual overlap of friction pairs, ratio between number of reagents, presence of inert gases and type of reactions on rate of chemical reactions in cracking process in upper layer of polymer linings of friction units of braking devices is established. It has been shown that when evaluating the equilibrium of a chemical reaction, it is necessary to take into account the change in Gibbs energy.

*Key words:* friction pair, top layer of lining, cracking process, chemical potential, components of friction material, Gibbs energy.

Поступило в редакцию: 28.07.2020  
После доработки: 11.12.2020  
Принято к публикации: 17.12.2020