

УДК 629 - 413 - 592.112

Журавлев Д. Ю., к. т. н.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ВОЗБУЖДАЮЩИЕ ФАКТОРЫ В РОБАСТНЫХ ТРИБОСИСТЕМАХ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ (ЧАСТЬ 3)

***Аннотация.** В материалах статьи проиллюстрированы возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов, к которым отнесены: концентраторы механических напряжений в ободке тормозного шкива и закономерности изменения; электрические и тепловые эффекты в поверхностных и приповерхностных слоях металлополимерных пар трения и показано влияние на отмеченные слои протекающих в них физико-химических процессов. Подтверждена гипотеза квазивыравнивания энергетических уровней поверхностных слоев пар трения тормоза.*

***Анотація.** У матеріалах статті проілюстровані збуджуючі фактори в робастних трибосистемах стрічково-колодкових гальм, до яких віднесено: концентратори механічних напружень в ободі гальмівного шкива і закономірності зміни; електричні та теплові ефекти в поверхневих і приповерхневих шарах металополімерних пар тертя і показано вплив на відмічені шари, що протікають у них, фізико-хімічних процесів. Підтверджено гіпотезу квазівирівнювання енергетичних рівнів поверхневих шарів пар тертя гальма.*

***Annotation.** The paper examines excitation factors in robust tribosystems of band-shoe brakes which include: mechanical stress concentrators in a brake pulley rim and its mechanical stress, electrical and thermal effects in surface and near-surface layers of metal-polymer friction pairs. The impact of physicochemical processes that occur in these layers is showed. The hypothesis of quasi-levelling of energy levels of the surface layers of the brake friction pairs is confirmed.*

Постановка проблемы. Возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов, в первую очередь, необходимо учитывать в поверхностных и подповерхностных слоях металлополимерных пар трения, подверженных электротермомеханическому фрикционному воздействию, не только на микроуровне, но и на наноуровне.

Анализ последних исследований. Во второй части материалов статьи [1] показаны возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов, к которым отнесены: усилия натяжения набегающей и сбегающей ветвей тормозной ленты и эксплуатационные параметры на которые они влияют. Эксплуатационными параметрами являются: импульсные нормальные усилия, динамический коэффициент трения, импульсная сила трения, импульсная работа трения, импульсный тормозной момент. При этом достигнуто квазистабильности эксплуатационных параметров на ветвях тормозной ленты за счет изменения площадей контактов микровыступов накладки при фрикционном взаимодействии с рабочей поверхностью обода тормозного шкива.

Нерешенные части общей проблемы. К возбуждающим факторам в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза отнесены: механические и температурные напряжения на последние из которых действует механизм ионно-электронной тепловой поляризации поверхностных слоев полимерной накладке, а также воздействие физико-химических процессов, наблюдаемых в поверхностных и приповерхностных слоях пар трения, исходя из их энергетического баланса.

Основная часть. Концентраторы напряжений. В большинстве случаев усталостное разрушение возникает в местах концентрации механических напряжений, появляющихся как результат неусовершенствованной конструкции тормозного шкива, а также из-за нарушения технологии его производства. Кроме того, сильными концентраторами напряжений являются микротрещины на рабочей поверхности обода тормозного шкива, возникающих под действием температурных напряжений. Поэтому при конструировании отдельных узлов тормозного шкива ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, подверженных действию переменных динамических (импульсных нормальных усилий) и тепловых (поверхностных и объемных температурных градиентов) нагрузок. Необходимо стремиться к прогнозированию зарождения и развития многоочаговых зон микротрещин на поверхностях обода шкива. Кроме того, необходимо учитывать тот фактор, что импульсные нормальные усилия на пятнах контактов микровыступов создают контактные напряжения изгиба.

Исходя из вышеизложенного тормозной шкив должен быть спроектирован таким образом, чтобы в нем было минимальное число концентраторов напряжений (сопряжение обода шкива со стороны: рабочей поверхности с ребордами; нерабочей поверхности с крепежным выступом [рис. 1]). Последний смещен в сторону заземления обода шкива, что позволяет данную конструкцию рассматривать как консольную балку. Такое конструктивное решение

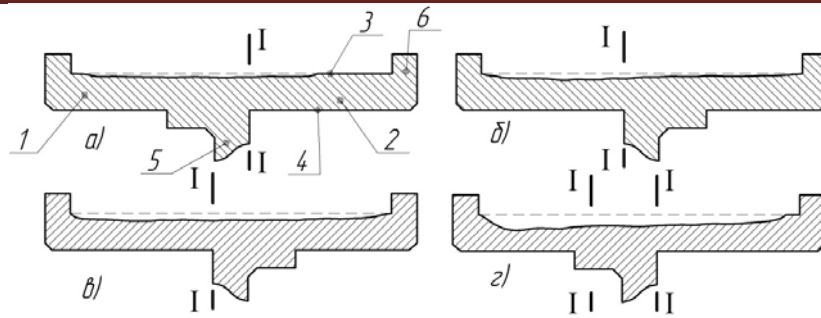


Рисунок 1 а, б, в, г – Износ рабочих поверхностей ободов левых (а, в) и правых (б, г) тормозных шкивов в зависимости от стороны закрепления их краев: 1, 2 - заземленный и свободный край обода; 3, 4 - рабочая и нерабочая поверхности обода; 5 - крепежный выступ; 6 - реборды; I - I - сечения

способствует возникновению изгибающих (растягивающих) напряжений, действующих за крепежным выступом (в сечениях I-I) в направлении свободного края обода, вызывая тем самым момент напряжений изгиба.

Механические напряжения. Поведение стали 35ХНЛ, из которой изготовлен обод тормозного шкива, подверженной усталости, лучше всего изучать методом многократного аperiодического нагружения рабочей поверхности обода шкива переменными импульсными нормальными усилиями в процессах фрикционного взаимодействия микровыступов пар трения «шків – накладки». Количество циклов нагружения пар трения тормоза оценивалось по методике, приведенной в работе [2]. По результатам промышленных испытаний пар трения ленточно-колодочного тормоза строится графическая зависимость уровня максимального напряжения от логарифма количества циклов до разрушения, получая так называемую $\sigma - N$ - кривую (рис. 2). Для стали 35ХНЛ характерен ярко выраженный горизонтальный участок на кривой усталости; при напряжениях ниже этого уровня разрушение рабочей поверхности обода шкива не наступит даже при продолжительных испытаниях; напряжение, соответствующие горизонтальному участку кривой, характеризуется пределом усталости.



Рисунок 2 – Типичная $\sigma - N$ кривая для стали 35ХНЛ

Влияние амплитуды механических напряжений проявляется на характерном виде зависимости $\sigma = f(N)$, являющейся наиболее важным параметром. Обод тормозного шкива (сталь 35ХНЛ) может работать под действием импульсных удельных нагрузок, и как следствие, механических напряжений, называемых пределом усталости, однако последний существенно меньше предела упругости. Сильное влияние на практике оказывает температура рабочей поверхности обода шкива на форму $\sigma - N$ - кривой. Предел усталости существенно меньше предела упругости; например сталь 35ХНЛ с нижним пределом текучести 490 МПа имеет предел усталости 311 МПа. Это подтверждает истину о том, что движение дислокаций наблюдается много ниже той точки на кривой «деформация – напряжение», которая соответствует макроскопическому началу пластической деформации. Предел усталости стали 35ХНЛ существенно изменяется в зависимости от режима нагружения пар трения ленточно-колодочного тормоза, т.е. количества свечей опускаемых в скважину, и как следствие, энергонагруженности рабочей поверхности обода. Известно, что имеется приблизительная связь между пределом усталости и пределом прочности на растяжение. Среднее значение отношения предела усталости к пределу прочности на растяжение равна приблизительно 0,5; последняя величина весьма чувствительна применительно к качеству рабочей поверхности обода тормозного шкива, а также к тому имеются ли на ней рыски и царапины. Для мартенситных и ферритных сталей, указанное соотношение может достигать, соответственно, 0,25 и 0,6.

Электрические и тепловые эффекты. При фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов пар трения тормозов происходит изменение их площадей. При этом дискретные контакты имеют переменное электротермическое сопротивление с различной энергетической активностью микро- конденсаторов и термобатарей, обладающими возможностью мгновенного их переключения при изменении площадей пятен контактов микровыступов. При соблюдении условий на первой стадии фрикционного взаимодействия ($A_{\Phi} < A_{Н}$), исходя из того, что фактическая площадь контактирования (A_{Φ}) мала по сравнению с номинальной ($A_{Н}$) и при этом производится суммирование составляющих генерируемых токов, носящих импульсный и волновой характер. После чего при условии $A_{Н} = A_{\Phi}$ развивается трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентом механических свойств поверхностного слоя обода шкива. В дальнейшем, под воздействием механических, электрических и тепловых полей импульсного характера в поверхностном слое, образованного из пятен контактов микровыступов происходит разрушение тонких пленок вторичных структур, а их поверхности при этом подвержены механическому и термическому искажению при

высоких волнах текущих напряжений, в состав которых входят суммарные механические напряжения (от концентраторов напряжений и удельных нагрузок) и остаточные термические напряжения. При этом на пленки вторичных структур действует механизм ионно-электронной тепловой поляризации различной интенсивности, ослабляющий тем самым поверхностный слой [3, 4].

В процессе электротермомеханического трения пары «металл – полимер» возникает электрическое поле, приложенное к поверхностному слою полимера. При этом на его пятнах контактов микровыступов генерируются заряды, которые смещаются по отношению друг к другу, вследствие чего полимер становится поляризованным. Внешнее электрическое поле индуцирует в поверхностном слое полимера элементарные электрические моменты $p=qx$, где q - значение смещающихся электрических зарядов; x - взаимное их смещение [5].

В образовании такого индуцированного полем электрического момента могут участвовать:

- электроны, смещающиеся из равновесных положений в атомах относительно положительно заряженных ядер;
- ионы, отклоняющиеся от равновесного состояния в кристаллической решетке;
- диполи - полярные молекулы или радикалы, - изменяющие под действием поля свою ориентацию. В образовании микродиполей принимают полярные или электрически заряженные зоны полимера либо его поверхностные слои с их неоднородной структурой.

В первом случае механизм поляризации называют упругим или поляризационным со смещением (схематически показаны на рис. 3 а и б). В поляризованном состоянии ($E=0$) электронные оболочки атомов симметричны относительно ядер (рис. 3 а, левый фрагмент), так что эффективный центр отрицательного заряда совпадает с положительно заряженным ядром. Соответственно, электрический момент равен нулю ($p=0$), так как он определяется произведением $qx=p$, а взаимное смещение зарядов q^+ и q^- отсутствует, т.е. $x=0$. Если же приложить электрическое поле (рис. 3 б), то в каждом атоме, молекуле и ионе электронные орбитали искажаются и смещаются по отношению к ядрам, вследствие чего центр отрицательного заряда смещается по отношению к положительно заряженному ядру, так что возникает элементарная поляризованность $p=qx>0$. В этом заключается механизм электронной упругой поляризации.

В ионном кристалле в отсутствие приложенного извне электрического поля (рис. 3 а, центральная часть) катионы и анионы находятся в узлах кристаллической решетки. Эта система зарядов электрически нейтральна и не образует электрических моментов

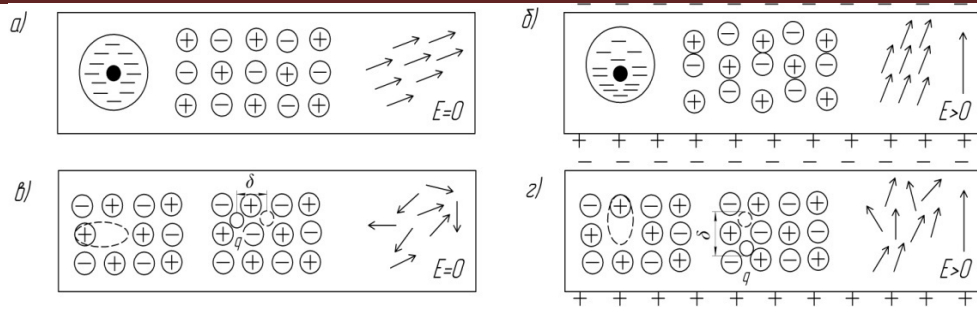


Рисунок 3 а, б, в, г – Макроскопические три механизма упругой (а, б) и тепловой (в, г) поляризации проиллюстрированные на фрагментах диэлектрика при отсутствии и наличии электрического поля E

(поляризации). Но во внешнем электрическом поле (рис. 3 б) катионы и анионы смещаются под действием кулоновских сил, образуя полярную решетку с элементарными моментами q^+ и q^- . Так возникает в кристаллах ионная упругая поляризация, которая для поверхностных слоев имеет большое значение.

На рис. 3 а показаны энергетические характеристики упругой поляризации. Упругая поляризация связанной частицы (иона в кристалле, а электрона в атоме, диполя в решетке) определяется выражением $U=1/2cx^2$, где c - коэффициент упругой связи, x - упругое смещение из равновесного положения. В начальный момент времени электротермомеханического фрикционного взаимодействия $x=0$ и частица локализуется на дне параболической потенциальной ямы. В дальнейшем при возникновении электрического поля, то к упругой энергии заряженных частиц добавляется их энергия, приобретенная в поле: $U=1/2cx^2 - qx E$, вследствие чего минимум энергии сместится в положение $x>0$, в котором частицы уже обладают элементарным электрическим моментом $p=qx$ и усиливают поляризацию. Размыкание пар трения приводит к быстрому установлению прежнего равновесного положения при $x=0$, и упругая поляризация исчезает.

На правом фрагменте (рис. 3 а, б) изображен третий механизм упругой поляризации - упругий поворот диполей. Он возможен лишь при наличии в поверхностном слое полимера собственной полярности.

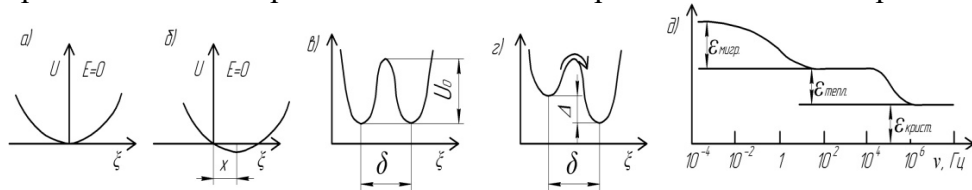


Рисунок 4 а, б, в, г, д – Энергетический баланс различных видов поляризации при: упругом (деформационном) (а, б) и тепловом (релаксационном) (в, г) механизме; частотном изменении диэлектрических вкладов миграционной, тепловой и кристаллической (фундаментальной) поляризации (д)

Диполи в такой «полярной» кристаллической решетке связаны взаимодействием и ориентированы внутрикристаллическим полем F , которое они сами и создают (рис. 4 *a*). Электрическое поле, возникающие при фрикционном взаимодействии микровыступов пар трения изменяет ориентацию каждого из диполей и всей полярной структуры вместе, в результате чего изменяется и электрический момент диэлектрика, т.е. происходит его индуцированная ориентационная поляризация (рис. 4 *б*). Такой механизм дипольной упругой поляризации.

Если разомкнуть пары трения, то все рассмотренные механизмы способствуют быстрому возвращению системы в равновесное, неполяризованное состояние (рис. 3 *a*). Электроны займут электрически симметричное положение относительно ядер за счет кулоновских сил притяжения к ядру: катионы и анионы вернутся в свое стабильное (равновесное) положение в узлах кристаллической решетки под действием сил отталкивания электронных оболочек ионов. Область «согласованной дипольной поляризации» обычно также возвращается в исходное положение, где механические напряжения для данной системы ориентированных диполей минимальны.

Кроме упругой поляризации, электроны, ионы и диполи (макродиполи) могут участвовать также в механизмах как тепловой, так и миграционной поляризациях.

В случае слабой связи некоторых электронов, ионов и диполей на процессы поляризации существенно влияет тепловое (хаотическое) движение частиц в структуре диэлектрика (рис. 3 *в*). На этом рисунке выделены примесные частицы, а не основные структурные элементы полимера. Электрически заряженные примеси относительно слабо связаны в кристаллической решетке, но все же они вынуждены быть локализованными в окрестности структурных дефектов полимера.

Оставаясь локализованными в микрообъеме, эти частицы под действием теплового движения совершают тепловые скачки, перемещаясь на расстояния порядка атомных размеров. Поэтому их скачкообразное перемещение в $10^4 \div 10^6$ раз превышает величину малых упругих смещений структурных единиц кристалла (при упругой поляризации), и поэтому эти скачки могут оказывать существенное влияние на диэлектрическую проницаемость.

Электронная тепловая поляризация обусловлена слабосвязанными электронами, например, электронами, компенсирующими структурными дефектами. К таким дефектам, например, относят анионные вакансии - отсутствующие отрицательные ионы, - как показано на рис. 3 *в* (слева). Компенсация заряда происходит потому, что кристаллическая решетка всегда электронейтральна - т.е. число отрицательных зарядов в ней равно

числу положительных. Компенсирующий вакансию электрон локализуется на одном из окружающих вакансию катионов (положительных ионов), однако его орбиталь в данном случае сильно деформирована - она вытянута в область анионной вакансии для компенсации отсутствующего заряда (рис. 3 в), что и приводит к самопроизвольному образованию в решетке кристалла локального электрического момента $p_0 = ql_0$, где l_0 примерно соответствует параметру решетки ($\sim 0,2$ нм). Величина этого момента не определяется внешним электрическим полем при фрикционном взаимодействии; при этом такой «собственный» дипольный момент p_0 в тысячи раз превышает электрические моменты, индуцированные электрическим полем упругой поляризации ($p = qx$, где x - индуцированное упругое смещение - имеет порядок всего 10^{-6} нм). Даже при разомкнутом состоянии пар трения, время от времени, под действием теплового хаотического движения локализованный вблизи вакансии электрон перескакивает с одного соседнего с вакансией катиона на другой, преодолевая некоторый потенциальный (энергетический) барьер U_0 (рис. 2 б). При этом направление дипольного момента p_0 изменяется. Несмотря на то, что таких дефектных мест в реальном диэлектрике достаточно много (их концентрация составляет $10^{24} \div 10^{26} \text{ м}^{-3}$ при концентрации основных (структурных) единиц кристалла $\sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$), макроскопическая поляризация в кристалле не возникает, поскольку «собственные» диполи в любой момент ориентированы хаотично.

Приложенное извне электрическое поле понижает потенциальный барьер в благоприятном для поляризации направлении (рис. 4 б), что и приводит к избыточной ориентации диполей «электрон – катион» в соответствии с приложенным полем (рис. 3 з). Таков, в основных чертах, механизм электронной тепловой поляризации. Тепловой такая поляризация называется потому, что скачки электрона между катионами осуществляется за счет тепловой энергии кристалла. При этом электрическое поле, оставаясь энергетически слабым воздействием $\Delta U < kT$ (k - постоянная Больцмана) (рис. 4 в) приводит только к некоторому перераспределению ориентационных положений собственных локальных электрических моментов p_0 .

Наряду с механизмом ионно-электронной тепловой поляризации поверхностного слоя полимерной накладки одновременно на поверхности и в подповерхностных слоях металлического фрикционного элемента формируются по его длине и толщине температурные градиенты, способствующие аperiодическим циклическим процессам «расширение (охлаждение) - сжатие (нагревание)», вызывающим тепловое равновесие, и как следствие, образование сетки микротрещин в виде фрактальной структуры, состоящей из многоугольников, т.е. слившихся треугольников с

различными площадями поверхностей на участках концентрации термонапряжений в минимальных по толщине поперечных сечениях подповерхностного слоя металлического фрикционного элемента.

Следует заметить, что температурные напряжения (рис. 5 а, б), изменяющиеся по волновым закономерностям в металлическом фрикционном элементе уподоблены закономерностям энергетического баланса тепловой поляризации поверхностного слоя полимерной накладки (рис. 5 в) из-за того, что в первом и втором случае основной составляющей расчета является импульсное нормальное усилие, действующее в металлополимерной паре трения. Кроме того, энергетический баланс поверхностных слоев на микро- и наноуровнях является квазиодинаковым.

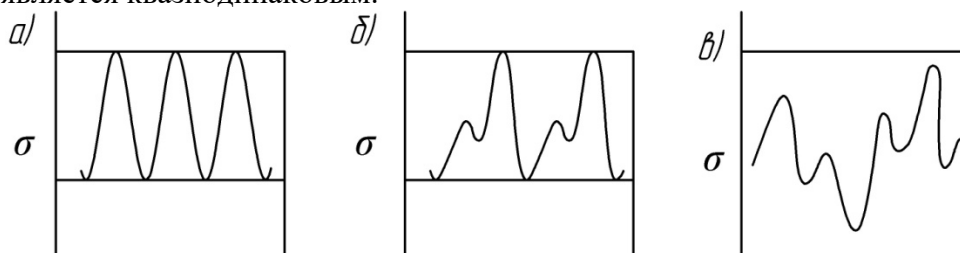


Рисунок 5 а, б, в – Температурные напряжения изменяющиеся по волновым закономерностям в металлическом а, б - однотипном; в - неоднотипном фрикционном элементе

С повышением поверхностной температуры обода шкива при фрикционном взаимодействии пар трения тормоза $\sigma - N$ - кривая сдвигается в сторону более высоких суммарных напряжений, но форма ее почти не претерпевает изменений.

Влияние физико-химических процессов. В эксплуатационных условиях микротрещины возникают на рабочей поверхности обода шкива и зависят как от ее состояния, физико-химических процессов происходящих на площадках пятен контактов, а также от влияния окружающей среды в интервалах времени между торможениями.

В качестве заменителя стали 35ХНЛ могут быть стали: 35ХМЛ, 30ХГСФРЛ, 35ХМФЛ, 30ХГСФЛ, 25Х2НМЛ. Химический состав стали 35ХНЛ следующий: кремний (Si) - (0,20 - 0,42)%; медь (Cu) не более 0,30%; марганец (Mn) - (0,40 - 0,90)%; никель (Ni) - (0,70 - 0,90)%; фосфор (P) не более - 0,04%; хром (Cr) - (0,50 - 0,80)%; сера (S) не более - 0,040%. Приведем краткую характеристику подчеркнутых элементов, которым свойственно образовывать гидриды с водородом (H).

Кремний (Si) - твердое вещество, в котором каждый атом кремния связан с четырьмя соседними атомами кремния, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга (в вершинах правильного тетраэдра). Такое расположение атомов приводит к образованию трехмерной структуры; эти твердые соединения

называется сетчатыми. Твердое вещество с такой структурой характеризуется как высокой температурой плавления, так и кипения.

Остальные два элемента образуют молекулярные твердые вещества. Атомы белого фосфора и серы прочно связаны в небольшие молекулы (они имеют формулы P_4 и S_8), но притяжение между молекулами незначительно. Изменение свойств в указанных элементов не носит простого характера, так как их молекулы построены весьма различно.

Перечисленные выше химические элементы образуют гидриды, которые представляют собой молекулярные газообразные соединения. Они имеют формулы SiH_4 , PH_3 и H_2S , соответственно, которые указывают на число атомов водорода на атом элемента в молекуле гидрида. Начиная с кремния, образование молекулярных соединений указывает на то, что элементы принимают электронную конфигурацию последующего инертного газа (аргона, являющегося последним элементом третьего периода периодической таблицы) путем образования обобщенных электронных пар с атомами водорода.

Влияние механизма электронной и ионной тепловой поляризации при электротермомеханическом трении на процессы переноса в металлополимерных парах «металл – полимер» позволило объяснить процесс наводораживания металла, вызывающего, как известно, охрупчивание и диспергирование деформируемого трением слоя. Водород выделяется при активации электротермомеханическим трением реакцией дегидрогенизации углеводородов поверхностного слоя полимерной наклейки, его поставщиком являются продукты термодеструкции органического связующего (например, различные смолы), а также попаданием влаги на рабочую поверхность металлического фрикционного элемента в трибологической системе. При образовании молекулы водорода из двух атомов обе их $1s$ - орбиты объединяются с появлением молекулярной орбиты, которая занята двумя электронами с противоположными спинами и охватывает оба ядра (рис. 6).

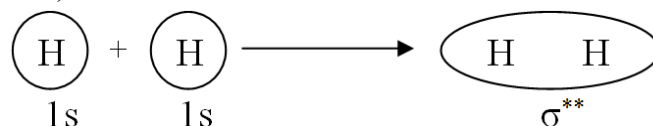


Рисунок 6 – Схема возникновения молекулы водорода из двух атомов

Эта орбита симметрична относительно прямой, связывающей оба ядра, и называется σ (сигма) - молекулярной орбитой. Энергия молекулярной орбиты минимальна, и, следовательно, энергия связи максимальна в том случае, когда составляющие атомные орбиты перекрываются в наибольшей степени, так как перекрывание облегчает обмен электронов. Две s - орбиты проявляют большую склонность к взаимному перекрыванию, поэтому ковалентная связь (σ^{**} - связь) в молекуле водорода очень устойчива. Диффузионный поток водорода

формируемый на рабочей поверхности стального фрикционного элемента направляется в область с максимальной локальной температурой [6], расположенную на некоторой глубине от поверхности трения (смещение зоны с максимальной температурой под названием температурного ножа, впервые было теоретически обосновано В.А. Кудиновым), где водород хорошо растворяется. Согласно происходящим процессам, водород, поглощаемый металлом, способен диссоциировать, причем именно уникально малый размер протона ($1 \cdot 10^{-13}$ см) и его противоположный заряд по отношению к металлу помогают ему довольно легко проникать в решетку. В этом, в частности, и проявляется участие электризации трением в наводораживании поверхности стали.

Выводы. Таким образом, установлено влияние ряда возбуждающих факторов на поверхностные и подповерхностные слои металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов и произведена оценка их энергетических уровней в процессе электротермического трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев Д.Ю. Возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов (часть II) / Д.Ю. Журавлев. - Одесса: Подъемно-транспортная техника (журнал). №1, 2016. - С. - .
2. Огар П.М. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход / П.М. Огар, Д.Б. Горохов // Системы. Методы. Технологии. - М., 2009. - С.30 - 38.
3. Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть первая) / Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко, Э.А. Джанахмедов и др. // Научно-техн. журнал. - Киев: НАУ. - №2 (63). - 2014. - С.30 - 50.
4. Электромеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть вторая) / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.Ю. Журавлев и др. // Научно-техн. журнал. - Киев: НАУ. - №3 (64). - 2014. - С.4 - 16.
5. Джанахмедов А.Х. Синергетика и фракталы в трибологии / А.Х. Джанахмедов, О.А. Дышин, М.Я. Джавадов // Баку: Апострофф, 2014. - 504 с.
6. Трибология. Электротермомеханические основы, анализ и синтез на нано, - микро - и миллиуровнях и технические приложения: учебник для вузов / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.Ю. Журавлев [и др.]; под редакцией А.И. Вольченко. - Киев; Краснодар, 2015. - 371 с.