

УДК 629.113: 621.2.082.18

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В ПАРАХ ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

М. В. КИНДРАЧУК¹, Д. А. ВОЛЬЧЕНКО², Н. А. ВОЛЬЧЕНКО³,
Н. М. СТЕБЕЛЕЦКАЯ⁴, А. В. ВОЗНЫЙ²

¹ Национальный авиационный университет, Киев;

² Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа;

³ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар (Россия);

⁴ Бережанский агротехнический институт

Описан метод промышленных исследований пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, предотвращающий выделение водорода из стальной поверхности обода шкива электрическим полем с одноименными положительными зарядами, которые ограничивают движение ионов водорода.

Ключевые слова: ленточно-колодочный тормоз, усовершенствованные пары трения, материалы фрикционных элементов, водородный износ, износостойкость материалов, эксплуатационные параметры, энергетические уровни.

Водородное изнашивание как один из процессов разрушения поверхностей металлических фрикционных элементов в условиях электротермомеханического трения обусловлено разложением углеводородных связей с выделением водорода, который диффундирует в поверхностный слой сталей, вызывая их охрупчивание [1–5]. В частности, установлено, что размеры продуктов износа после наводороживания образцов существенно больше, чем до (линейные размеры отличаются в 5–6 раз) [1–3]. Кроме того, отделяющиеся в условиях трения качения и скольжения, имеют значительные очаги схватывания и повреждаемости, нежели отколовшиеся от ненаводороженных образцов. Однако в литературе не описано их влияние на электротермомеханическое трение и износ пар трения.

Поэтому цель настоящей работы – исследовать влияние водорода на износ в узлах трения тормозных устройств, применяемых в машиностроении, а также снизить водородный износ в зоне фрикционного взаимодействия при разомкнутых парах трения, создавая при этом основное и остаточное положительные электрические поля между их рабочими поверхностями.

Материалы и методы исследования. Изучали особенности конструкции и работу усовершенствованных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки (рис. 1а, б). Фрикционные накладки 3 устанавливали на тормозных лентах 2, прикрепляя одним концом (от сбегающей ветви ленты) к балансиру 11, а другим (от набегающей ветви) – к мотылевым шейкам 6 и 9 коленчатого вала 10. Серийные ленточно-колодочные тормоза буровой лебедки работают так: перемещением рукоятки 1 поворачивается коленчатый вал 10, в результате чего бурильщик затягивает тормозные ленты 2 с фрикционными накладками 3 и они садятся на ободы тормозных шкивов 4. В тормозном шкиве 4 выполнены продольные пазы 12 типа “ласточкин хвост”, в которые по периметру обода от его свободного края с постоянным шагом установлены дополнительные фрикционные элементы 13, изготовленные из ретинакса ФК-24А. По их длине размещены таблетки 14 из

фторопласта-4. Фрикционные элементы отделены от обода шкива 4 и таблеток теплоизоляцией 15. При этом правая реборда 16 съемная и крепится по периметру торца обода шкива 4 болтами 17. Фрикционные накладки 3 крепятся к тормозной ленте 2 с помощью планок 18. Между накладками по периметру тормозной ленты 12 установлены распорные планки 19. Здесь использовали следующие обозначения: R – радиус рабочей поверхности обода тормозного шкива; r – радиус кривошипа коленчатого вала; ω – угловая скорость вращения шкива; \bar{S}_1 , \bar{S}_2 – натяжение набегающей и сбегаящей ветви тормозной ленты; F – рабочее усилие на рычаге управления тормозом; q^+ и q^- – положительные и отрицательные заряды электрического поля.

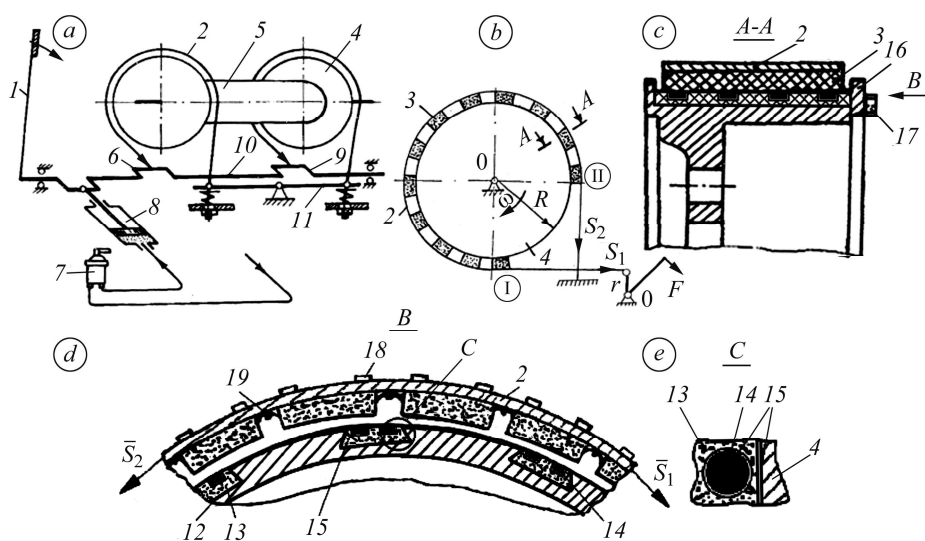


Рис. 1. Кинематические схемы ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки (а, б); поперечное и продольное сечения фрикционного узла тормоза (с, д); теплоизоляция фрикционного элемента, таблетки-вставки (е): 1 – рычаг управления тормозом; 2, 3 – тормозные ленты с накладками; 4, 16 – тормозной шкив со съемной ребордой; 5 – барабан лебедки; 6, 9, 10 – мотылевые шейки коленчатого вала; 7, 8 – кран пневмоцилиндра; 11 – балансир; 12 – продольные пазы типа “ласточкин хвост”; 13 – дополнительные фрикционные элементы из “ретинакса” ФК-24А; 14 – таблетки-вставки из фторопласта-4; 15 – теплоизоляция; 17 – крепежные болты; 18, 19 – крепежные и распорные планки.

Fig. 1. Kinematic scheme of band-block brakes of a winch (a, b); cross and longitudinal sections of the brake friction unit (c, d); heat insulation of the friction element-tablets (e): 1 – brake control lever; 2, 3 – brake pads with band; 4, 16 – brake pulley with removable flange; 5 – winch drum; 6, 9, 10 – crank crankshaft journals; 7, 8 – valve of pneumatic cylinder; 11 – balancer; 12 – longitudinal grooves of “dovetail” type; 13 – additional friction elements of “Retinax” FK-24A; 14 – tablets of “fluoroplastic-4”; 15 – heat insulation; 17 – fixing screws; 18, 19 – fixing and spacer strips.

Результаты и их обсуждение. При фрикционном взаимодействии микровыступов пар трения ленточно-колодочного тормоза в режиме высоких скоростей скольжения и удельных нагрузок генерируются электрические токи и аккумулируются тепловые, а следовательно, повышаются поверхностные температуры и их градиенты. При температуре выше 400°C из поверхностных слоев фрикционной накладки выгорает связующий компонент – формальдегидная смола, вследствие чего возникает коррозионная водосодержащая среда, создающая условия для трибокрекинга, сопровождающегося выделением свободного водорода. По-

следний, взаимодействуя с поверхностными и подповерхностными слоями материалов (кремнием, серой, белым фосфором, титаном, железом и др.) пар трения, образует неустойчивые гидриды. Кроме того, поверхностные слои микровыступов подвергаются электронно-ионной тепловой поляризации, при которой наблюдается резкий скачок температурного градиента по толщине поверхностного слоя. Вследствие этого существенно усиливается водородное изнашивание поверхностных слоев фрикционных материалов пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, что обусловлено активным выделением в зоне трения водорода из полимерной накладки из-за трибоккрекинга, обеспечивающего его непрерывное поступление в поверхностный слой стального обода шкива; его адсорбцией на поверхностях металлополимерных пар трения; диффузией в деформированный поверхностный слой обода шкива, зависящей от градиентов напряжений; особым видом разрушения поверхности вследствие одновременного развития большого количества зародышей микротрещин по всей зоне контакта.

Свойство полимерных материалов ФК-24А и таблеток-вставок из фторопласта-4 в материале ФК-24А “избирать” заряд, вероятно, связано со способностью присоединять ионы и электроны к их поверхностям, насыщая двойные электрические поверхностные слои полимера. После фрикционного взаимодействия пар трения ФК-24А и ФК-24А–таблетки-вставки из фторопласта-4 первый материал будет заряжен положительно и играть роль донора электронов из-за большей диэлектрической проницаемости по сравнению с вторым, который заряжен отрицательно и играет роль акцептора электронов.

Совершенно другая картина, когда из поверхностных слоев этих материалов выгорают связующие компоненты, из которых выделяется вода, обладающая большой диэлектрической проницаемостью. В этом случае фрикционные элементы ФК-24А с таблетками-вставками из фторопласта-4 из-за более низкой допустимой температуры для их компонентов становятся донорами электронов, насыщая двойной электрический поверхностный слой обода тормозного шкива, а следовательно, увеличивая разность потенциалов между его участками стали 35ХНЛ–ФК-24А с таблетками-вставками. Поверхностные температурные градиенты существенно превышают глубинные в приповерхностном слое обода шкива. Кроме того, линии положительного электрического поля будут блокировать ионы водорода (H^+), не давая им проникнуть в приповерхностный слой.

Аналогичная ситуация в поверхностных и приповерхностных слоях фрикционного материала ФК-24А, допустимая температура компонентов которого более высокая. Здесь материал ФК-24А становится донором электронов для компонентов, насыщая двойные электрические слои (жидкость (один слой) и поверхностный слой накладки (второй)), между которыми и возникает разность потенциалов, вследствие чего усиливается положительное электрическое поле поверхностных слоев накладок на тормозной ленте.

Энергетические уровни, формирующиеся на рабочих поверхностях усовершенствованных пар трения тормоза, обусловлены контактным электротермомеханическим процессом от соударения микровыступов металлополимерных пар трибосистемы. В результате пластической деформации в местах контакта электрические токи генерируются до тех пор, пока сохраняется их дискретность и фактическая площадь контактирования мала по сравнению с номинальной ($A_r \leq A_0$). Таким образом, в результате суммирования составляющих генерируемых токов на пятнах фрикционного контакта возникает электрическое поле и при $A_r \geq A_0$ в дальнейшем аккумулируется нестационарный тепловой поток, вызывающий неравномерное температурное поле.

При трении между полимером и металлом (рис. 2), в отличие от разрыва контакта между металлами или их трения, зарядение поверхности происходит

постепенно при износе пятен контактов микровыступов в результате увеличения и разрыва контактов между “пятнами заряжения”; при этом накапливается большой заряд.

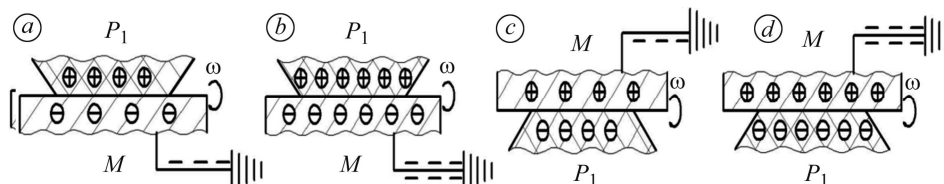


Рис. 2. Накопление электрических зарядов в парах трения полимер (P_1)–металл (M) (a, b) (прямых) и металл (M)–полимер (P_1) (c, d) (обратных) при их фрикционном взаимодействии.

Fig. 2. Electric charges accumulation in the friction pairs polymer (P_1)–metal (M) (a, b) (direct) and metal (M)–polymer (P_1) (c, d) (reverse) during frictional interaction.

При взаимодействии микровыступов металлополимерного трибосопряжения, когда значения работы выхода (W) электронов и ионов из металла и полимера будут равны, поверхность может и не заряжаться. Тогда полимер называют электрофобным, в отличие от электрофильного, который электризуется при $W_M > W_P$ и $W_M < W_P$. На поверхности электрофильных материалов (при выгорании их связующих с поверхностных слоев таблеток-вставок, а также полимерных элементов и накладок) образуется тонкий слой влаги, которая облегчает заряджение.

При контактировании двух полимерных пленок материалов (P_1) + (P_2) (рис. 3) без трения на их поверхности возникает плотность зарядов

$$\sigma_S = \frac{e(W_{P_1} - W_{P_2})}{1/\rho_{S_1} + 1/\rho_{S_2}},$$

где W_{P_1} , W_{P_2} – уровни Ферми поверхностей первой и второй полимерных накладок; ρ_{S_1} и ρ_{S_2} – плотности поверхностных состояний полимерных накладок и фрикционных элементов с таблетками-вставками.

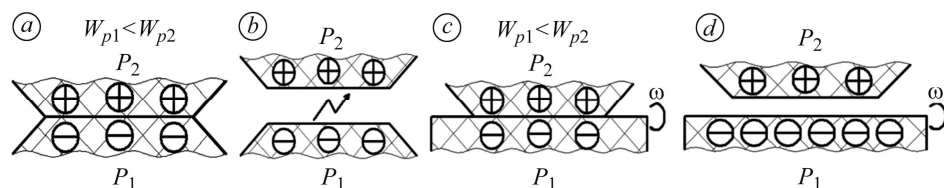


Рис. 3. Накопление электрических зарядов в парах трения полимер (P_1)–полимер (P_2) при статическом (a), фрикционном (c) взаимодействии и разомкнутом их состоянии (b, d).

Fig. 3. Electric charges accumulation in the friction pairs polymer (P_1)–polymer (P_2) under static (a), frictional (c) interaction and their opened state (b, d): W_{P_1} , W_{P_2} – Fermi levels of the surfaces of the 1st and 2nd polymer pads.

Если $W_{P_1} > W_{P_2}$, то первая накладка будет заряжаться положительно, если $W_{P_1} < W_{P_2}$, то отрицательно (рис. 2). Ряд полимеров, расположенных так, что каждый последующий заряжается отрицательно по отношению к предыдущему при контакте с ним, называют трибоэлектрическим. Положение полимера в трибологическом ряду характеризует его склонность к заряджению положительным или отрицательным зарядами. При мгновенном разрыве контакта между двумя пятна-

ми микровыступов с зарядами $+q$ и $-q$ возникает большая разность потенциалов. Физико-механические свойства материалов пар трения тормоза указаны в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сталей тормозных шкивов

Содержание сталей, mass%		Валентность		Преобладающий тип собственной проводимости		Гидриды
35ХНЛ (I)	35 ХМЛ (II)	I	II	I	II	
2,20...0,42 Si	0,2...0,4 Si	4		Полупроводник		SiH ₄
До 0,3 Cu	–	1, 2	–	<i>n</i>	–	–
0,4...0,9 Mn	0,4...0,9 Mn	2, 3, 4, 5, 6, 7		<i>n</i>		–
0,7...0,9 Ni	–	2	–	<i>n</i>	–	–
До 0,04 P	До 0,04 P	3		<i>n</i>		PH ₃
0,5...0,8 Cr	0,8...1,1 Cr	3, 6		<i>p</i>		–
До 0,04 S	До 0,04 S	2, 4, 6		Диэлектрик		H ₂ S
–	0,3...0,4 C	–	2, 4	–	Диэлектрик	–
–	0,2...0,3 Mo	–	6	–	<i>p</i>	–
36,62...97,82 Fe	97,82...98,02 Fe	1, 3		<i>n</i>		FeH, FeH ₃

Гидриды SiH₄, PH₃ и H₂S указывают на количество атомов водорода на атом элемента в их молекуле. Начиная с кремния, образование молекулярных соединений свидетельствует о том, что элементы принимают электронную конфигурацию последующего инертного газа (аргона, являющимся последним элементом третьего периода периодической таблицы), образуя обобщенные электронные пары с атомами водорода.

По результатам исследования влияния механизма электронной и ионной тепловой поляризации при электротермомеханическом трении на процессы переноса в металлополимерных парах металл–полимер можно объяснить наводороживание металла, вызывающее охрупчивание и диспергирование деформируемого трением слоя. Водород выделяется при активации электротермомеханическим трением реакции дегидрогенизации углеводородов поверхностного слоя полимерной накладке. Его поставщиками являются продукты термодеструкции органического связующего (например, различные смолы), а также влага, попадающая на рабочую поверхность металлического фрикционного элемента в трибологической системе.

Диффузионный поток водорода, формируемый на рабочей поверхности стального фрикционного элемента, направляется в зону с максимальной локальной температурой, расположенную на некоторой глубине от поверхности трения (смещение зоны с максимальной температурой), где он растворяется. Таким образом, водород, поглощенный 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.

Усовершенствованные пары трения испытывали в ленточно-колодочных тормозах буровых лебедок У2-5-5 при естественном и вынужденном их охлаждении во время спуска в скважину на глубину 4108,0 м колонны бурильных труб. Колонну набирали из 102 свечей, из которых шесть УБТ (утяжеленные бурильные трубы), а остальные – ЛБТ (легкие) с общим весом 962,23 кН. При этом температура окружающей среды 20,2°C, а давление 0,0942 МПа.

Выявили (табл. 2), что при сохранении ряда основных технических характеристик аналога предлагаемые пары трения снижают энергетическую интенсивность износа накладок в 1,3 раза при заданных режимах их нагружения, влияющих на разность потенциалов между микровыступами (табл. 3).

Наибольшую разность потенциалов имеет пара трения ФК-24А–ФК-24А + + фторопласт-4, поскольку доля таблеток-вставок по площади во фрикционном элементе из ФК-24А составляет всего 14%. Кроме того, они практически не влияют на диэлектрическую проницаемость материала фрикционного элемента, что способствует генерированию положительного заряда в этой паре трения и, как следствие, возникновению положительного электрического поля, которое препятствует адсорбции ионов водорода в приповерхностные слои пар трения при их замкнутом и разомкнутом состояниях. Это обстоятельство и играет решающую роль в снижении водородного износа пар трения тормоза.

Таблица 2. Трибозлектрические и эксплуатационные параметры усовершенствованного ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки У2-5-5

Фрикционная пара	Знак заряда		Эксплуатационные параметры					
	+	-	сила трения, $F_f = (S_1 - S_2)$, kN	динамический коэффициент трения, f	температурные градиенты		Тормозной момент M_f , kNm	Энергетическая интенсивность изнашивания накладок I , $\mu\text{g}/\text{J}$
Два химически одинаковые элементы	Плотность элемента				поверхностные t , $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$	объемные t_v , $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$		
	Большая	Маленькая						
ФК-24А–сталь 35ХНЛ	Полимер	Металл	259,6	0,38	40,0... 60,0	6,0... 15,0	188,2	2,5
ФК-24А– ФК-24А + + фторо- пласт-4*	Полимер с ди- электрической проницаемостью		200,98	0,3	4,5...8,5	2,0... 3,0	159,44	1,35
	Большой	Меньшей						
Сталь 35ХНЛ–сталь 35ХНЛ	Металл с твердостью		102,5	0,15	80,0... 100,0	15,0... 20,0	74,3	0,3
	Большой	Меньшей						
Результаты экспериментальных исследований усовершенствованных пар трения			265,0	0,4	30,0... 50,0	4,5... 13,0	195,0	1,95

*Примечание: площадь поверхности таблеток-вставок с фрикционными элементами составляет $(45...75)^{\circ}$ от дуги обхвата лентой с накладками обода шкива.

Таблица 3. Разность потенциалов между микровыступами пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки У2-5-5

Пары трения	ФК-24А– сталь 35ХНЛ	ФК-24А–ФК-24А+ + фторопласт-4	Сталь 35ХНЛ– сталь 35ХНЛ
Разность потенциалов ΔV , mV	0,47	0,74	0,27

В зависимости от диаметра и ширины обода беговой дорожки шкива и устанавливается площадь таблеток-вставок и фторопласта-4, внедренного во фрикционные элементы из полимерного материала ФК-24А, расположенных по периметру обода шкива.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод позволяет значительно повысить износостойкость рабочих поверхностей пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки путем снижения в них водородного износа в зоне фрикционного взаимодействия, а при разомкнутых парах трения – путем создания основного и остаточного электрического поля за счет дополнительных пар трения.

РЕЗЮМЕ. Описано метод і засоби промислових досліджень пар тертя стрічково-колодкових гальм бурових лебідок, які блокують виділення водню зі сталеві поверхні ободу шкива електричним полем з однойменними позитивними зарядами, які обмежують рух іонів водню.

SUMMARY. The method and means of the industrial research of the friction pairs of band-block brakes of a winch, with block hydrogen release from the steel surface of the rim of the pulley by electric field with similar positive charges, which are the limiting factor for hydrogen ions is described.

1. *Защита* от водородного износа в узлах трения / Под. ред. А. А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 134 с.
2. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника (износ и безызносность). – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
3. *Необходимость* учета влияния водорода на износостойкость материалов в тормозных парах трения автомобилей / В. А. Колесников, А. В. Калинин, А. И. Балицкий, Я. В. Хмель // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2009. – № 11(141). – С. 62–65.
4. *Балицкий О. І., Колесніков В. О., Кав'як П.* Триботехнічні властивості аустенітних марганцевих сталей та чавунів в умовах тертя ковзання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 5. – С. 55–60.
(*Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Kawiak P.* Triboengineering properties of austenitic manganese steels and cast irons under the conditions of sliding friction // *Materials Science*. – 2005. – **41**, № 5. – P. 624–630.)
5. *Особливості* руйнування наводнених високоазотних марганцевих сталей в умовах тертя кочення / О. І. Балицький, В. О. Колесніков, Я. Еліаш, М. Р. Гаврилюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 4. – 110–116.
(*Balyts'kyi O. I., Kolesnikov V. O., Elias Y., Havrylyuk M. R.* Specific features of the fracture of hydrogenated high-nitrogen manganese steels under conditions of rolling friction // *Materials Science*. – 2015. – **50**, № 4. – P. 604–611.)

Получено 23.12.2016