

УДК 621.891

С. И. КРИШТОПА

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

**ПОДАТЛИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ФРИКЦИОННЫХ
УЗЛОВ И ИХ СТЫКОВ ПРИ КОНТАКТНО-ИМПУЛЬСНОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ
ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ**
(часть II)

В материалах статьи показаны: силы трения, возникающие в металлополимерных прямых и обратных парах трения, и формируемые при этом удельные нагрузки.

Ключевые слова: *металлополимерные пары трения, податливость, тормозные устройства, напряженно-деформированное состояние.*

Введение. В первой части статьи были освещены следующие вопросы: общие закономерности и микрогеометрия контактного взаимодействия металлополимерных пар трения; природа контактно-импульсного взаимодействия микровыступов в паре трения «полимер-металл»; напряженно-деформированное состояние полимерной фрикционной накладки; податливости стыков металлополимерных пар трения. Совокупность данных вопросов требует рассмотрения распределения сил в паре трения и удельных нагрузок во фрикционных узлах в процессе торможения без и при изнашивании пары трения.

Состояние проблемы. Расположение микровыступов на дорожке трения металлического фрикционного элемента определяет их опорные поверхности, которым оказывают сопротивление опоры поверхности полимерных накладок в прямых парах трения. При их взаимодействии развиваются импульсные нормальные усилия, которые являются основными слагаемыми удельных нагрузок на заданных зонах контакта. В обратных парах трения вращаются фрикционные накладки и поэтому микрогеометрия взаимодействия их контактирующих поверхностей несколько иная. Связано это, в первую очередь, с тем, что нагрузки между внешними и внутренними парами трения имеют переменный характер. Самым существенным эксплуатационным параметром является распределение сил в паре трения.

Распределение сил в паре трения и удельных нагрузок во фрикционных узлах. Закономерности изменения эпюр удельных нагрузок и их величин в парах трения у взаимосвязи со скоростью скольжения, электрическими и тепловыми процессами влияют на:

- напряженно-деформированное состояние материалов под действием импульсных нормальных сил и сил трения;
- напряженно-деформированное состояние, вызванное изменением структуры поверхностных и приповерхностных слоев материалов (дефектами);
- технологическую податливость сопряженных поверхностей на отдельных участках их контактно-импульсного взаимодействия;
- генерируемые прямые и обратные электрические токи при контактно-импульсном взаимодействии микроучастков поверхностей;
- работу выхода электронов с металлического фрикционного элемента и ионов из приповерхностного слоя полимерных накладок;

– электротермическое напряженно-деформированное состояние материалов пар трения под действием импульсных электрических токов, и как следствие, мгновенных тепловых потоков;

– скорость изменения динамического коэффициента трения, и как следствие, тормозного момента;

– время циклов разрушения микроучастков и средние размеры частиц, что от них освобождаются.

Остановимся, в первую очередь, на динамических составляющих удельных нагрузок в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза.

В процессе торможения. Удельные нагрузки в паре трения распределяются по длине ее контактирующих элементов неравномерно. Основной причиной такого распределения является неравномерное распределение сил в контакте «лента-накладка». Наибольшие значения удельных нагрузок (рис. 1) наблюдаются по краям накладки, то есть там, где сосредоточена наибольшая импульсная сила ее взаимодействия с внутренней поверхностью ленты. Такая связь распределения сил между накладкой и сопряженной деталью фрикционного узла предопределена, очевидно, относительно низкой изгибной жесткостью накладки и участка тормозной ленты над ней.

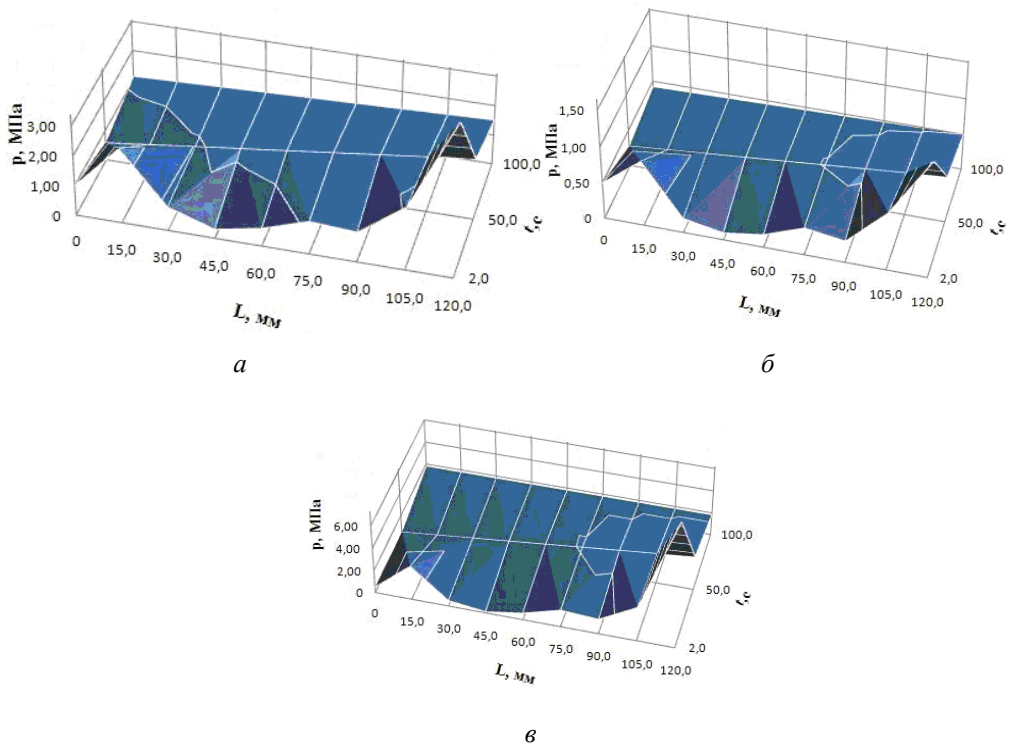


Рис. 1. Распределение удельных нагрузок p в паре «накладка-шкив» по длине накладки L в диапазоне суммарной продолжительности работы t пары трения при различных вариантах нагружения I (а), II (б) III (в)

Распределение удельных нагрузок в паре «накладка-шкив» зависит от радиуса шкива $R_{ш}$, с уменьшением которого неравномерность распределения увеличивается.

Нормальная сила N , носящая импульсный характер, в начале процесса торможения предопределяет перераспределение удельных нагрузок в парах трения, увели-

чивая их на набегающих участках взаимодействия и уменьшая на сбегаящих, что видно из рис. 1, а, б. Степень неравномерности распределения возрастает в 1,95; 1,81; и 2,12 разы, соответственно, для вариантов нагружения I, II, III (табл.1).

Таблица 1

Характеристики динамического взаимодействия пары трения «полимер-металл»

Вариант нагружения	f	Удельные нагрузки, МПа			$K_{p,ш}$	$\frac{b_p, \text{МПа}}{\text{мм}}$	$\tau_{p,L}$	$N_{ш}$	F_T
		p_{max}	p_{min}	p_{cp}				κH	
I	0,05	3,20	0,65	1,306	1,95	0,00165	0,070	36,10	0,1
	0,35	5,12	0,14	1,306	3,81	0,1170	0,377	36,10	12,64
II	0	1,01	0,29	0,455	1,93	0,00095	0,051	12,60	0,1
	0,25	1,68	0,09	0,455	3,49	0,00293	0,325	12,60	3,152
III	0,05	5,62	0,80	1,848	2,61	0,00362	0,087	51,04	0,1
	0,35	10,3	0,15	1,864	5,54	0,00193	0,354	50,74	17,76

В табл. 1 использованы следующие обозначения: f – динамический коэффициент трения скольжения в парах «накладка-шквив»; p_{max} , p_{min} , p_{cp} – удельные нагрузки: максимальные, минимальные и средние; $K_{p,ш}$ – коэффициент неравномерности распределения удельных нагрузок; b_p , $\tau_{p,L}$ – коэффициенты: угловой уравнения линейной регрессии, корреляции; N , F_T – силы: нормальная, трения.

Указанные цифры свидетельствуют о том, что неравномерность распределения сил в паре трения «накладка-шквив» повышаются с увеличением нормальной силы N и, особенно, с уменьшением радиуса тормозного шкива. Линейная закономерность удельных нагрузок по длине рабочей поверхности фрикционной накладки, согласно рис. 2, указывает на то, что ее микровыступы работают в различных режимах контактного взаимодействия с ободом тормозного шкива в зависимости от вариантов нагружения во времени. Кроме того, играет роль какая поверхность рабочей поверхности накладки рассматривается: набегающая или сбегаящая.

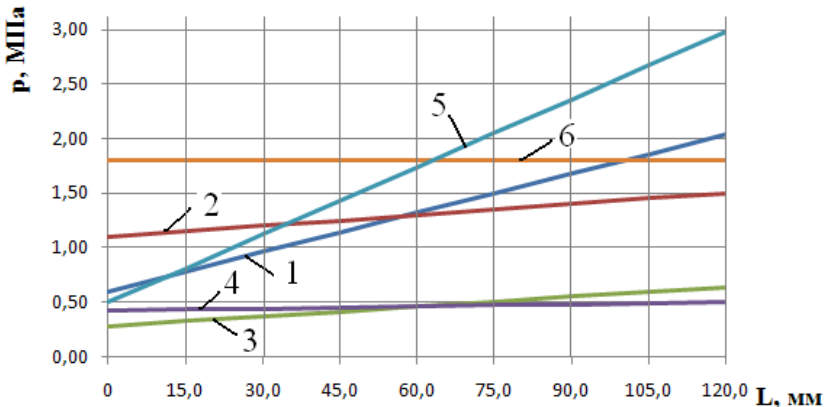


Рис. 2. Распределение удельных нагрузок p в контакте пары «накладка-шквив» по длине накладки L в диапазоне суммарной продолжительности работы t при различных вариантах нагружения: I – 1 – [$t=(47-57)$ с], 2 – [$t=(97-11)$ с]; II – 3 – [$t=(47-57)$ с], 4 – [$t=(97-111)$ с]; III – 5 – [$t=(47-57)$ с], 6 – [$t=(97-111)$ с]

Важно отметить тот факт, что неравномерность распределения удельных нагрузок в парах трения «лента-шквив» и «накладка-шквив» с участком тормозной ленты над фрикционной накладкой (по сути рассматривается отдельное тормоз-

ное устройство) всегда суммарно больше, чем на отдельных набегающей и сбегающей ветвях тормозной ленты с фрикционными накладками, взаимодействующими с рабочей поверхностью тормозного шкива, что подтверждается также работами [1–4]. Суммарная нормальная сила N взаимодействия накладки с тормозным шкивом, как и средние удельные нагрузки, в незначительной степени зависят от динамического коэффициента трения при одинаковых условиях нагружения пар трения при длительном режиме их работы.

В процессе торможения при изнашивании пары трения. Графические зависимости, которые иллюстрируют характер изменения удельных нагрузок p и линейного износа рабочей поверхности накладки по длине, зависят от суммарной продолжительности t работы пары трения при вариантах нагружения I и II , приведенные на рис. 3. Параметры динамического взаимодействия фрикционной накладки с сопряженными деталями узла трения в ходе поэтапного изменения суммарной продолжительности работы пары трения взяты из работы [4].

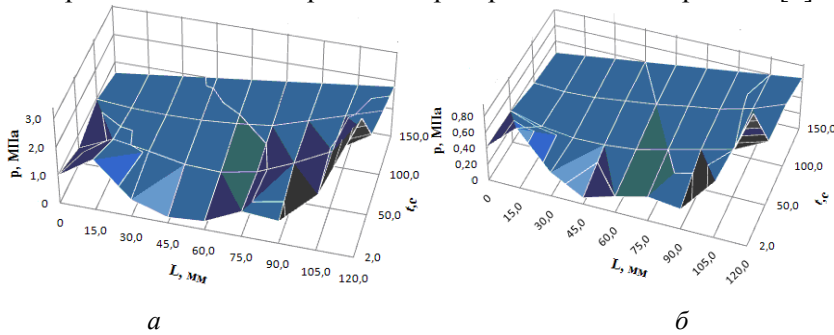


Рис. 3. Распределение удельной нагрузки p в контакте между поверхностями шкива и накладки по ее длине L в диапазоне суммарной длительности работы t пары трения при различных вариантах нагружения I (а) и II (б)

Как видно из графической зависимости рис. 3, во время процесса изнашивания фрикционной накладки наблюдается сглаживание ее микровыступов микровыступами рабочей поверхности шкива и поэтому наблюдается уменьшение неравномерности распределения удельных нагрузок в зонах взаимодействия из-за увеличения контактных площадей. Коэффициент $K_{p,ш}$ для вариантов нагружения I и II уменьшается, соответственно, от 3,812 до 1,085 и от 3,489 до 0,769. При этом среднее значение удельной нагрузки в паре трения, а также суммарные силы (N и F_T) взаимодействия накладки со шкивом и возникающая при этом реакция R_a , не зависят в некоторой степени от длительности взаимодействия фрикционного узла при его работе в установившемся режиме.

За величинами N_i и размерами зон контактного взаимодействия рассчитаем удельные нагрузки, определяя при этом их значения: максимальное p_{max} , минимальное p_{min} и для крайних зон со стороны набегающей (p_n) и сбегающей (p_c) ветви тормозной ленты.

Кроме того, рассчитаем коэффициенты распределения удельных нагрузок вдоль дуги накладки: индекс корреляции $\tau_{p,L}$ между удельными нагрузками и длиной пары трения и неравномерностью нагружения $K_{p,ш}$

$$K_{p,ш} = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{cp}}, \quad (1)$$

и угловой коэффициент b_p уравнения линейной регрессии

$$p = p_{\text{cp}} + b_p \left(L - \frac{1}{2} L_m \right), \quad (2)$$

где L – координата узла на дуге накладки; ($L = 0$ для узла в крайней точке накладки); L_m – длина дуги накладки.

Параметры линейного износа ξ имеют аналогичные индексы. Параметры распределения износа рабочей поверхности накладки по ее длине находим по зависимостям вида:

$$k = \frac{\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}}{\xi_{\text{cp}}}, \quad (3)$$

$$\xi = \xi_{\text{cp}} + b_p \left(L - \frac{1}{2} L_m \right). \quad (4)$$

Что касается отдельно взятых тормозных режимов при взаимодействии пары трения «накладка-шкив» при различных вариантах нагружения I и II с одинаковой суммарной продолжительностью работы $t = (130155)$ с, то согласно рис. 4 четко видно, что первый режим нагружения является более тяжелым (прямая 1), чем второй.

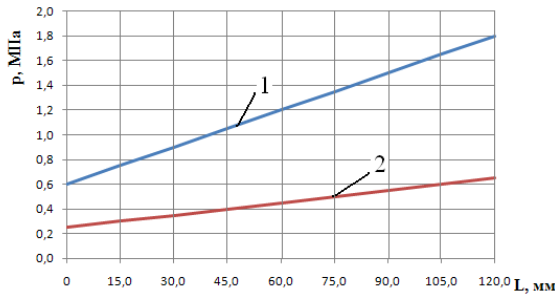


Рис. 4. Распределение удельной нагрузки p в контакте между поверхностями шкива и накладки по ее длине L в диапазоне суммарной длительности работы $t = (130-155)$ с пары трения: прямые 1 и 2 – I-й и II-й варианты нагружения

Подтверждает вышеотмеченную истину закономерности линейного износа рабочей поверхности фрикционной накладки рис. 5, так как он в среднем 3,25 раза больше, чем при втором режиме.

Рассмотрим работу участка тормозной ленты с фрикционной накладкой в процессе установившегося торможения. Параметры уравнения линейной регрессии, которые используются для оценки распределения удельных нагрузок по длине накладки, не изменяются с увеличением продолжительности работы пары трения. Такая стабильность динамического взаимодействия фрикционной пары может быть объяснена тем, что сила, которая действует на накладку со стороны тормозной ленты (во время исследований), не изменялась. Сравнение изменения величины (p_n) и (p_c) по краям накладки и на центральных ее участках на первых и последних этапах модельного эксперимента позволяют считать, что после достижения линейного распределения p по длине накладки, оно сохраняется и в процессе последующей работы фрикционной пары. На это указывают также данные о том, что на последних этапах исследований модели величины $\tau_{p,L}$ и $K_{p,ш}$ изменяются незначительно, а средние удельные нагрузки являются постоянными в течение всего периода установившегося режима работы.

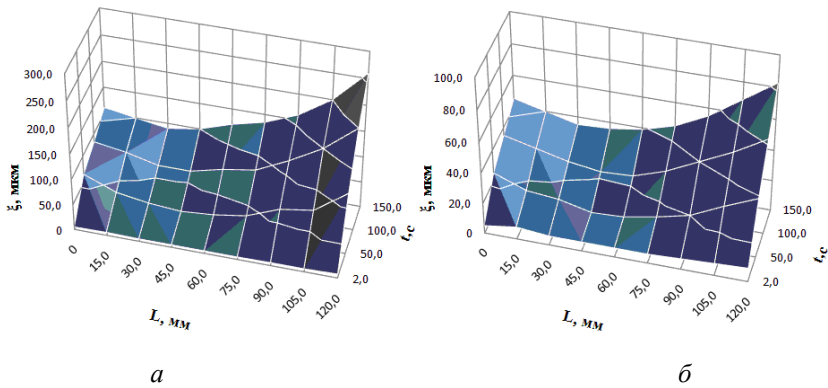


Рис. 5. Зависимости изменения линейного износа ξ накладки по ее длине L от суммарной продолжительности работы t пары трения при различных вариантах нагружения I (а) и II (б)

Отметим, что суммарная нормальная сила, которая действует на накладку со стороны тормозной ленты, является большей, чем суммарная нормальная реакция от тормозного шкива для всех вариантов ее нагружения. Разница этих сил тем больше, чем большей является разница между силами натяжения набегающих и сбегающих участков ленты и, как следствие, чем больший угловой коэффициент в уравнении линейной регрессии. Это связано с тем, что силы трения на набегающем участке поверхности больше, чем на сбегающем. Поэтому суммарный вектор этих сил имеет компоненту, которая направлена от рабочей поверхности тормозного шкива к накладке, которая уменьшает действующую нормальную реакцию. Кроме того, часть нормальной силы, действующей от тормозной ленты, затрачивается непосредственно в паре трения «накладка-шкив» на диссипацию механической энергии в тепловую.

Выделим еще одну особенность поведения накладки в процессах износа, которая влияет на формирование эксплуатационных параметров фрикционных узлов тормоза. Силы, прилагаемые от тормозной ленты к накладке, прижимают ее к цилиндрической поверхности тормозного шкива с радиусом $R_{ш}$. Поскольку износ рабочей поверхности накладки является неравномерным – она теряет свою начальную цилиндрическую форму, заложенную в ее конструкции с заданным радиусом – но при этом она деформируется (сгибается), при достижении определенной толщины. Кроме того, в связи с асимметрией изнашивания, происходит поворот накладки за счет ее усиков относительно внутренней поверхности тормозной ленты. Объясняется это следующим образом. Во время нагружения рабочей поверхности накладки первоначальный импульсный контакт происходит на микровыступах, имеющих наименьший износ. Внешние силы, которые действуют на нее, образуют неравновесный момент относительно микрозоны начального контакта. Момент сил предопределяет поворот накладки на цилиндрической поверхности шкива, а микрозона контакта смещается к положению состояния равновесия.

Существенное неравномерное распределение удельных нагрузок связано с неравномерным распределением сил в паре «рабочая поверхность тормозной ленты – не рабочая поверхность накладки», консольным креплением накладки к ленте, посредством ее усиков и относительно низкой изгибающей жесткостью узла «лента-накладка». Очевидно, самое незначительное уменьшение зоны микровыступов контактов и резкое увеличение удельных нагрузок можно объяснить увеличившимся износом рабочих поверхностей накладок, которые первыми входят в микроим-

пульсные контакты с рабочей поверхностью тормозного шкива в начальной стадии торможения. Такими накладками являются накладки, установленные на среднем участке тормозной ленты, а также смещенные в сторону ее набегающей ветви.

Выводы. Таким образом, как в процессе приработки, так и при работе на установившихся режимах торможения фрикционного узла ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки происходит квазистабильзация динамических параметров, в том числе и изнашивания, несмотря на постоянную дестабилизацию микрогеометрии пар трения, которые приближается к некоторым рациональным параметрам, способствуя при этом выравниванию удельных нагрузок на микроучастках из-за постоянной величины нормальной силы, и как следствие, наблюдается квазивыравнивание изнашивания рабочей поверхности фрикционной накладки.

Список литературы

1. Вольченко Н.А. Динамика многопарных фрикционных узлов/ Н.А. Вольченко. – Ростов: Северо-Кавказск. научн. центр высш. школы, 2005. – 238 с.
2. Джанахмедов А.Х. Трибологические проблемы в нефтегазовом оборудовании. – Баку: Элм, 1998. – 216 с.
3. Вольченко Н.А. Моделирование закономерностей изменения удельных нагрузок в парах трения тормозов буровой лебедки/Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, А.В. Возный//Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2012. – № 3(4). – С. 46-60.
4. Ленточно-колодочные тормоза/[Е.И. Крыжановский, А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко и др.]. Монография (научн. изд.). в 2-х томах. Том 2. Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 2007. – 215 с.- на укр. яз

Стаття надійшла до редакції 19.03.2013

С. И. КРИШТОПА

ПІДДАТЛИВІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ФРИКЦІЙНИХ ВУЗЛІВ ТА ЇХ З'ЄДНАНЬ ЗА КОНТАКТНО-ІМПУЛЬСНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ В МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАРАХ ТЕРТЯ ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

У матеріалах статті показані сили тертя, що виникають в металлополімерних прямих і зворотних парах тертя, і сформовані при цьому питомі навантаження.

Ключові слова: металлополімерні пари тертя, піддатливість, гальмівні пристарої, напружено-деформований стан.

S. I. KRYSHTOPA

CREEP OF FRICTION UNITS ELEMENTS AND THEIR CONTACTS AT CONDITIONS OF PULSE-CONTACT INTERRACTION AT METAL-POLYMER FRICTION PAIRS OF BRAKE DEVICES

Friction forces arising up in the polymer friction direct and reverse pairs and formed here specific loadings are shown in materials of the article.

Key words: metal-polymer friction units, brake devices, stressed-deformed state.

Криштопа Святослав Ігорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри нафтогазового технологічного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.