

УДК 62-92.113

Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА

Раскрыты явления возникновения и развития электро- и тепловзрыва в подповерхностном слое полимерной накладки, а также разрядного явления, пробивающего слой между микровыступами накладки.

Ключевые слова: полимерная накладка, металлический фрикционный элемент, микровыступы, пятно контакта, фрикционное взаимодействие, электрическое и тепловое поле, электрический и тепловой взрыв, электрический разряд.

Введение. Одним из важнейших разрешений научно-технического направления является создание полимерных материалов для фрикционных накладок, используемых в металлополимерных парах трения. Последние широко применяются в передаточных и тормозных устройствах. Полимерные материалы должны наряду с механическими, физико-химическими и тепловыми характеристиками обладать электрическими характеристиками [1]: электропроводящими, электретными, пьезо – и пирозлектрическими. При этом применение полимерных материалов с заданной совокупностью электрических характеристик, которые не превышали бы допустимых величин, отвечающим преобладающим условиям и режимам нагружения металлополимерным парам трения тормозных устройств.

В последнее время ряд исследователей обратили внимание на пробой полимерных диэлектриков. Последний бывает: электронный, электротермомеханический, электрический и тепловой [1; 2]. Однако во всех работах [13 – 19 и др.] не было уделено внимание взрыву металлических включений, которые применяются в качестве наполнителя полимерных накладок, и последующему за ним тепловому разряду. Взрыв металлических включений происходит в подповерхностном слое полимерной накладки в процессах электротермомеханического трения в тяжело нагруженных фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. В дальнейшем, образовавшиеся после взрыва продукты подвергаются разряду тепловыми токами.

Одной из основных характеристик при исследовании взрыва проволоки является термическая стойкость металла, нагреваемая импульсом электрического тока [3], или удельное его «действие» до взрыва.

Следует отметить, что удельное «действие» тока до момента плавления проволоки использовалось ранее для расчета плавких предохранителей [4] и мостиков электроконденсаторов [5]. Исследование электровзрыва проволоки выполнено в работах [3; 6]. Удобство использования характеристики удельного «действия» импульса тока до взрыва определяется тем, что для большинства металлов она слабо изменяется (по сравнению с введенной энергией) в широком интервале изменения скорости ввода энергии в металл [7].

Выбор материала электрода и его поведение при фазовом переходе первого рода. Одно из главных свойств меди, которое определяет ее преимущественное использование в качестве электрода – очень высокая электропроводность (или низкое удельное электросопротивление). Второе важнейшее свойство меди – очень высокая теплопроводность. Наличие примесей и легирующих добавок и уменьшают электро – и теплопроводность меди (табл. 1), потому сплавы на медной основе значительно уступают «чистой» меди по указанным показателям.

Таблиця 1

Химический состав меди

Марка меди	Химический элемент, вес. %												
	Cu	P	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	Ag	O	Sb	Bi	Sn
M1	Не менее 99,9	–	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,004	до 0,003	до 0,005	до 0,001	до 0,001	до 0,002

Температура рекристаллизации меди для разных марок составляют 150–240 °С. Чем больше примесей, тем выше эта температура. Существенное увеличение температуры рекристаллизации меди дает серебро, цирконий. Например, введение 0,05 % Ag увеличивает температуру рекристаллизации вдвое, что проявляется в увеличении температуры размягчения и уменьшения ползучести при высоких температурах, причем без потери тепло- и электропроводности.

Выбор в качестве материала для электрода меди марки М1 был обусловлен следующим. Для испытаний электродов в лабораторных условиях требуется 3–4 шт. так как они подвергались исследованиям индивидуально. В эксплуатационных условиях на ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки устанавливалось как минимум десять электродов в одной накладке, расположенной на тормозной ленте. Это давало возможность одному из электродов накладки при электротермомеханическом трении попадать в пятно контакта рабочей поверхности шкива.

Остановимся на содержании меди в других элементах фрикционной пары. Так, во фрикционных накладках типа D имеет место наибольшее содержание меди, которое составило 11,77 %, а наименьшее 0,36 % – в типе F. Что касается стали (табл. 2), то в ней находится 0,25% меди. В то же время в стали находится очень малая доля фосфора, т.е. всего 0,04%, а в меди марки М1 он отсутствует.

Таблиця 2

Химический состав металлических фрикционных элементов

Металлический элемент трения	Химический элемент, вес. %									
	C	Cr	Cu	Mg	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
Чугун	3,0-3,5	0,15	0,001	0,001	0,6-1,0	0,50	0,60	0,15	1,8-2,4	92,66
Сталь	0,42-0,5	0,25	0,25	-	0,5-0,8	0,25	0,04	0,4	0,17-0,37	97,89

Таким образом, исходя из вышеизложенного соблюдено условие совместности материалов в парах трения.

В работе [8] были теоретически обоснованы контактные явления в паре трения «металл – полимер» при попадании полимерной накладки ниже и выше допустимой температуры для ее фрикционных материалов. При этом из металлического фрикционного элемента при условии достижения термокинетического равновесия в трибосистеме.

На рис. 1, а проиллюстрированы контактные явления в паре трения «металл (M_2) – металл (M_1) [электрод в накладке]» при работе накладки ниже допустимой температуры для ее материалов и в случае плавления электрода (рис. 1, б). Схема, представленная на рис. 1, б, была реализована в лабораторных условиях с применением электрической цепи для доведения твердого электрода до состояния плавления. На рис. 1, использованы следующие обозначения: E_{F1} , E_{F2} – энергетические уровни Ферми; d_0 – дебаевская длина пробега электронов; j_1 , j_2 – генерируемые электрические токи; eU_K^{BT} – возникающая разность потенциалов.

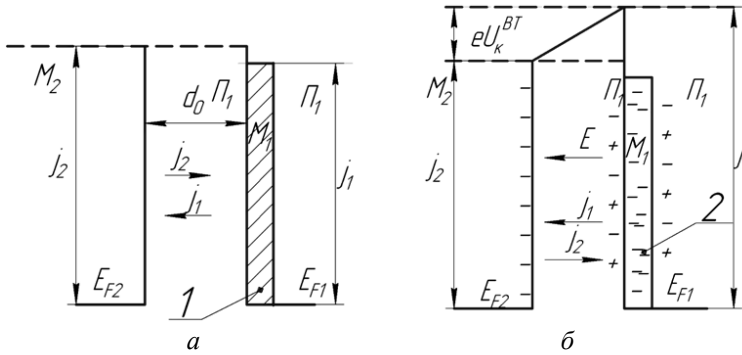


Рис. 1. Контактные явления в паре трения «металл (M_2) – полимер (P_1) и металл (M_2) – металл (M_1) [электрод в накладке]» при работе накладки ниже (а) допустимой температуры для ее фрикционных материалов и в случае фазового перехода первого рода (б) электрода: 1, 2 – электрод в твердом и в жидком состоянии

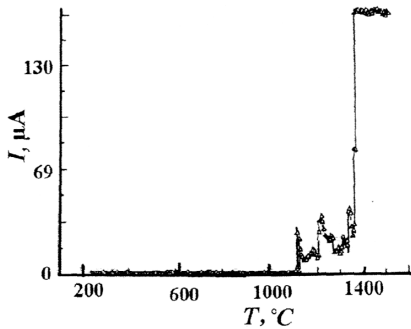


Рис. 2. Температурные зависимости тока, протекающего через систему «металл – металл», при использовании меди в качестве электрода. Напряжение, приложенное к системе, $U = 16,5$ В при $d = 0,3$ мм и $l = 30,0$ мм электрода

На рис. 2 представлена характерная зависимость тока, протекающего через систему сталь 35ХНМ – медный электрод Cu. Последний в виде цилиндрического стержня длиной $l = 30,0$ мм и диаметром $d = 0,3$ мм, посаженного с натягом в тело полимерной фрикционной накладки ФК-24А. При начальной комнатной температуре система находилась в диэлектрическом состоянии. Удельное электропроводление элементов трибосистемы приведено в табл. 3. При нагревании значение тока, протекающего через систему сталь 35ХНМ – медный электрод Cu, соприкасающегося по всему периметру с полимерными материалами накладки ФК-24А, остается неизменным до температуры 130–135°C. Выше этой температуры в измерительной цепи возникают флуктуации тока. Эти флуктуации

существуют при дальнейшем повышении температуры системы вплоть до температуры плавления медного электрода. Можно предположить, что наличие увеличивающихся по амплитуде флуктуаций тока связано с предпереходными явлениями, например, поверхностным плавлением материалов электрода, предотвращающим объемный фазовый переход.

Общие закономерности электродинамических характеристик пятен контактов микровыступов при их фрикционном взаимодействии. Проблема управления импульсными электрическими токами при фрикционном взаимодействии микровыступов пятен контактов металлополимерных пар становится актуальной при исследовании явлений электровзрыва в процессе электротермомеханического трения.

Когда импульс тока высокой плотности (10^4 – 10^6 А/мм²), генерируемый на пятнах контактов микровыступов, и усиленный разрядом микротермобатарей, сформированных при трении, а также микроконденсаторами пятен контактов микровыступов металлического фрикционного элемента проходит через проволоку, находящуюся в пятне контакта микровыступа полимерной накладки,

наблюдается взрывное разрушение проволоки. Последнее обстоятельство существенно влияет на прочность подповерхностного слоя полимерной накладки, и как следствие, на ее износо-фрикционные свойства.

Таблица 3

Теплофизические свойства элементов фрикционной пары

Параметры	Материалы		
	Сталь 35ХНМ	ФК-24А	Медь М1
Плотность при 20 °С, $\cdot 10^3$, кг/м ³	7,8	2,3 – 2,5	8,96
Температуры, °С:			
плавления	1535	1100	1083,0
кипения	2300	1200	2600,0
Удельная теплоемкость, Дж/(кг \cdot °С \cdot м ²)	475,0	1020,0	385,0
Теплопроводность, Дж/(кг \cdot °С)	38,0	0,75	24,1
Температуропроводность, a , м ² /с	$(1,07 - 1,01)10^{-5}$	$(3,0 - 3,5)10^{-7}$	$0,7 \cdot 10^{-5}$
Скрытая теплота плавления, кДж/кг	4100	–	181,3
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	0,000012	$(3 \dots 6) \cdot 10^{-4}$	0,000017
Удельное электросопротивление, Ом \cdot мм ² /м	0,1112	–	0,0178

Приведем схемы контактного взаимодействия микроучастков поверхностей трения с вмонтированными в их микровыступы простых электрических схем применительно к барабанно (рис. 3, а) и ленточно-колодочного (рис. 3, б) тормоза.

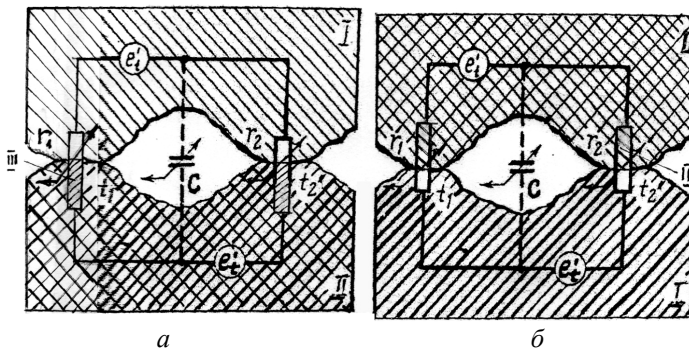


Рис. 3. Контактное взаимодействие микроучастков поверхностей трения: а – барабанно-колодочного тормоза; б – ленточно-колодочного тормоза: I и II – металлический и полимерный элемент; III – проволока

Известно, что в процессах электротермомеханического трения в непрерывно возникающих электрических и тепловых микроцепях генерируются импульсные электрические и тепловые токи, посредством которых нагреваются и плавятся проволоки (электроды) полимерных микровыступов. При этом электроды нагреваются и на них наблюдается рост падения напряжения (рис. 4, а, в). Кроме того, электроды нагреваются и в жидком состоянии до момента времени t_2 (рис. 4, а, б), когда их сопротивление начинает возрастать не только за счет нагревания материалов, но и за счет их взрывного расширения. В момент времени t_3 электроды теряют металлическую проводимость, сопровождающейся ростом их сопротивления, которое становится на несколько порядков выше первоначального. Последнее обстоятельство обуславливает обрыв тока в микроэлектрических цепях. Возникший при этом импульс напряжения на индуктивности микроэлектрических цепей в несколько раз превышает зарядное напряжение микроконденсаторов, которыми являются пятна контактов микровыступов металлического фрикционного эле-

мента. Это и есть электрический взрыв, с помощью которого его продукты попадают в зазоры между микровыступами. Затем наступает пауза тока за момент времени $t_3 - t_4$, когда продукты взрыва между микровыступами выдерживают оставшиеся на микроконденсаторах напряжение U_p . При этом продукты взрыва между микровыступами претерпевают процессы увеличения объема и уменьшения их давления. В момент времени t_4 благодаря стабильному импульсному току и остаточному напряжению генерируется объемный заряд, способствующий развитию разряда для пробоя толщины слоя между микровыступами.

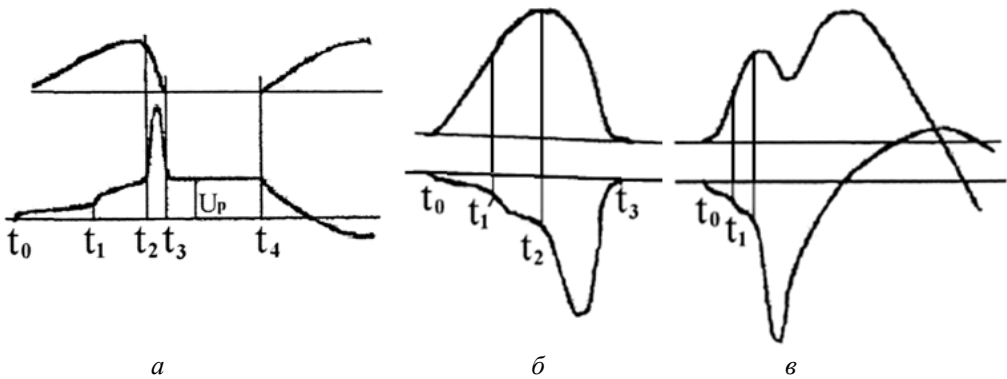


Рис. 4. Осциллограммы тока (*а*) и напряжения (*б, в*) при фрикционном взаимодействии в парах трения «металл – полимер»: *а* – взрыв с паузой тока (U_p – напряжение на конденсаторе в течении паузы тока: нагревание металла за период времени в твердом ($t_0 - t_1$) и в жидком ($t_1 - t_2$) состоянии; паузы времени: $t_2 - t_3$ – взрыва; $t_3 - t_4$ – импульса тока; $t_3 > t_4$ – дугового разряда); *б, в* – взрывы: согласованный и с разрядом по поверхности

Явления электровзрыва и теплоразряда при фрикционном взаимодействии в металлополимерных парах. Последующие исследования велись применительно к поиску более строгих соотношений между условиями взрыва и его результатами, в т.ч. и размером получаемых частиц, поскольку от последних зависит электропроводность в контакте и износ пар трения, при наличии между ними «третьего» тела, существенно влияющими на коэффициенты распределения тепловых потоков в телах трущихся элементов, и как следствие, на их износ-фрикционные свойства. Было установлено, что при некоторых условиях взрыв происходит к концу первого полупериода тока в цепи. К этому же моменту накопленная в микроконденсаторах энергия W_0 равна нулю, так как она расходуется на нагревание взрывающей проволоки, находящейся в пятне контакта микровыступа полимерной накладке и покрывает потери на сопротивление разрядного контура (составляет 0,05 – 0,1 от W_0). Таким образом, запасенная в микротермо-батареях энергия, работающих в режимах микротермоэлектро-генераторов и микротермоэлектрохолодильников [8], расходуется на эффект взрыва целенаправленно. Этот режим взрыва проволоки назван согласованным (рис. 4, *б*). В дальнейшем показано, что взрыв остается согласованным под действием n – ого количества микроцепей, если зарядное напряжение пятен контактов микровыступов металлического фрикционного элемента изменяется пропорционально площади сечения и/или длине проволоки. Полезные для практических расчетов соотношения были получены для взрывов с паузой тока и согласованных. Так, было установлено, что энергия режимов W , введенная в проволоку в течение первого импульса тока (до паузы тока) определяется соотношением:

$$W = (h_b W_0 A^2 Z)^{0,5}, \quad (1)$$

где $W_0 = CU_0^2/2$, Дж; C – емкость, мкФ; U_0 – кВ; $A = \pi d^2/4$ – площадь сечения проволоки, мм²; d – диаметр проволоки, мм; $Z = (L/C)^{0,5}$ – импеданс цепи, Ом;

$$h_b = \frac{\int_0^{t_3} i^2(t) dt}{A^2},$$

и имеет единицу измерения (А²с)/мм⁴ и означает удельное «действие» до взрыва, или термическую стойкость металла, нагреваемого импульсом тока [3]. Величины h_b для некоторых металлов были определены в [3; 6; 9–11] и даны в табл. 4.

Таблица 4

Удельная энергия сублимации и удельное действие некоторых металлов

Металл	W_c , Дж/мм ³	$h_b^* \times 10^{-5}$, (А ² с)/мм ⁴
Ag	27,7	1,04
Al	33,0	1,09 0,93
Au	37,7	0,523
Cu	47,8	1,95 2,107 1,97
Ni	53,9	0,732 0,75
Fe	55,4	0,506
Pt	58,5	0,945
W	92,2	0,8

*Величины h_b определены при плотностях тока в момент его максимума $j_m \approx 10^5$ А/мм².

Из равенства (1) видно, что при $W_0 = h_b A^2 Z$, если пренебречь потерями в цепи, $W \approx W_0$ другими словами,

$$W_0 = h_b A^2 Z \quad (2)$$

является одним из условий согласованного взрыва. Из этого соотношения также следует, что при пропорциональном изменении площади сечения проволоки и U_0 взрыв остается «согласованным», что и наблюдалось в [12].

Тепловой взрыв осуществляется в условиях, когда оказывается невозможным тепловое равновесие между компонентами подповерхностного слоя накладки и скоростными токами омывающей среды. При достаточно больших значениях энергии активации E (разностях между средней энергией частиц, вступающих в химическую реакцию и средней энергией всех частиц в поверхностной и подповерхностной зонах трибосистемы) скорость химической реакции V_X быстро возрастает с увеличением T .

Взрывное вещество по закону Аррениуса $V_X \sim Z \exp(-E/RT)$, где R – универсальная газовая постоянная; Z – предэкспоненциальный множитель, значение которого зависит от механизма элементарного акта реакции. Таким же образом растет и скорость тепловыделения Q_+ в объеме V подповерхностного слоя накладки:

$$Q_+ = V q_X Z \exp(-E/RT),$$

где q_X – тепловой эффект химической реакции.

Теплоотвод же во внешнюю среду Q_- через поверхности пятен контактов A микровыступов накладки зависит от T гораздо слабее:

$$Q_- = -\frac{\lambda}{r}(T - T_0)A,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; r – линейный размер пятна контакта; T_0 – температура среды.

Таблица 5

Некоторые характеристики металлов

№	Металл	W_c , эВ	W_s , эВ	W_c/A	T_k , °C
1	Цинк (Zn)	1,30	4,3	0,32	1179
2	Литий (Li)	1,69	2,35	0,72	1613
3	Свинец (Pb)	2,06	4,1	0,50	2024
4	Серебро (Ag)	2,95	4,7	0,63	2440
5	Олово (Sn)	3,39	4,3	0,79	2873
6	Алюминий (Al)	3,42	4,2	0,81	-2730
7	Медь (Cu)	3,56	4,5	0,78	2840
8	Никель (Ni)	3,67	5,0	0,73	3173
9	Золото (Au)	4,0	4,8	0,83	2553
10	Палладий (Pd)	4,78	5,0	0,96	3213
11	Железо (Fe)	4,08	4,7	0,87	3023
12	Хром (Cr)	3,82	4,58	0,83	2953
13	Платина (Pt)	5,51	6,3	0,87	4073
14	Иридий (Ir)	5,22	4,7	1,11	4656
15	Титан (Ti)	4,9	3,95	1,24	3533
16	Ванадий (V)	5,33	4,12	1,29	3673
17	Цирконий (Zr)	6,23	3,9	1,6	4623
18	Молибден (Mo)	6,9	4,1	1,68	~5073
19	Ниобий (Nb)	7,5	3,99	1,88	~5033
20	Тантал (Tm)	8,1	4,12	1,87	~5733
21	Вольфрам (W)	8,83	4,54	1,94	~6200

Условию теплового равновесия соответствует равенство $Q_+ = Q_-$, т.е. выделяющаяся в ходе реакции теплота должна полностью отводиться через поверхности пятен контактов микровыступов полимерной накладки. Однако такое равновесие не поддерживается, поскольку тепловыделение от химической реакции и собственно от электротермомеханического трения во много раз превышает теплоотвод от пятен контактов микровыступов полимерной накладки. Это вызвано тем, что темпы нагревания пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения во много раз превышают темпы их охлаждения скоростными токами омывающих сред.

На рис. 5 приведены графики скоростей тепловыделения (кривые 1–3) и теплоотвода (кривые 4–6) при различных температурах нагревания ($T_1^+ \dots T_n^+$) и охлаждения ($T_1^- \dots T_n^-$) металлополимерных пар трения. При температурах $T_1 \dots T_n$ (ниже допустимой температуры

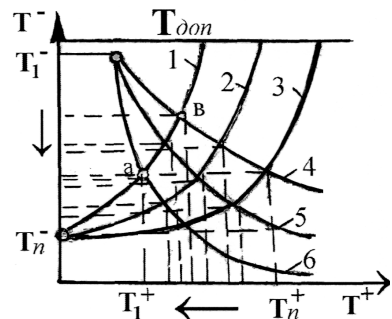


Рис. 5. Взаимосвязь между скоростями тепловыделения и теплоотвода в металлополимерных парах трения в зависимости от температур их нагревания и охлаждения

для материалов полимерной накладки) графики $Q_+(T_i)$ и $Q_-(T_i)$ пересекаются в n –ом количестве точек. Точка их пересечения a соответствует медленному течению химической реакции на пятнах контактов микровыступов полимерной накладки при температуре T_i . При повышении T_i^+ кривые нагревания 1–3 смещаются вправо из-за увеличения времени нагревания. Аналогичным образом смещаются кривые охлаждения 4–6, но при этом уменьшалось T_i с увеличением времени охлаждения. Точка пересечения кривой 1 с кривой 4 в указывает на то, что химическая экзотермическая реакция в подповерхностных слоях полимерной накладки самоускоряется – выделение теплоты приводит к повышению T , что в свою очередь, увеличивает скорость тепловыделения – возникает тепловой взрыв.

Обратив внимание на то, что в работе [13] при равной плотности введенной энергии размер получаемых частиц снижался от Zn к Cd и Ag, из чего следует, что в общем случае характерный размер частиц зависит не от введенной энергии, а от перегрева (K) материала проволоки, т.е. отношения W к некоторой характерной энергии материала, в качестве которой была принята удельная энергия сублимации W_c (табл. 4), которую можно найти в справочниках. Проверка этого предположения литературными данными и специальными экспериментами [7; 14; 15 и др.] на Cu, Al, Ag, Ni и на проволоках из других металлов полностью его подтвердила.

Разделив (1) на W получим:

$$K = W / (W_c A) = (h_b W_0 Z)^{0.5} / (W_c l), \quad (3)$$

где W_c – удельная энергия сублимации в Дж/мм³.

Из этого равенства можно найти длину проволоки $l = l_m$ при перегреве, когда $K = 1,0$ для согласованного режима взрыва. Заменив W_0 в (3) на его значение $h_b A^2 Z$ из (2), получим:

$$l_m = h_b A Z / W_c. \quad (4)$$

Для условий согласованного взрыва (3) также видно, что если U_0 и l изменяются пропорционально, то перегрев будет постоянным. В области $l > l_m$ и прочих равных условиях перегрев уменьшается обратно пропорционально длине проволоки, но взрыв остается согласованным, что и наблюдалось в [12; 13]. В области $l < l_m$ по мере уменьшения l взрыв будет протекать с паузой тока, а потом перейдет к взрыву с дуговым разрядом (рис. 4, в). При этом по мере уменьшения длины проволоки перегрев металла будет возрастать, а эффективность использования энергии W_0 – снижаться.

При возникновении микроэлектроцепей при реализации электровзрыва проволоки следует знать амплитуду получаемого импульсного тока.

Соответствующие соотношения для Cu, Al и Ag проволок было получено в [16; 17] в более удобном виде:

$$I_M = 0,751 I_0 (h_b A^2 Z / W_0)^{0.25}, \quad (5)$$

где $I_0 = U_0 / Z$ – амплитуда тока короткого замыкания в той же самой цепи.

При проведении исследований электровзрыва, находящегося в микровыступе полимерной накладке, возникает потребность в определении условий, при которых пауза тока становится равна нулю. Это позволяет оценить максимальный перегрев материала выбранной проволоки в имеющемся контуре или выбрать необходимые параметры контура (C, L, U_0) для обеспечения желаемого перегрева. Длина проволоки, при которой наблюдается такой тип взрыва когда время $t_3 - t_4 = 0$ (рис. 4, а), была названа допустимой, а ее значение для Cu, Al, и Ag прово-

лок было найдено в [18; 19] и в воздухе при нормальном давлении определяется соотношением:

$$l_k = \lambda_k d^2 Z \text{ мм}, \quad (6)$$

где $l_k = B(10^{-6} C^2 U_0^2 / d^5)^{0,36}$ и B – размерная величина, значение которой зависит от материала проволоки при принятых здесь единицах измерения равна для меди $1,35 \times 10^3$, для алюминия 2×10^3 и для серебра $1,5 \times 10^3$.

Обобщение экспериментальных данных показывает [10], что металлы можно разделить на две группы: а) чтобы взрыв происходил до разрушения микротермобатарей в процессе электротермомеханического трения, т.е. с отключением тока и образованием его паузы; б) взрыв которых всегда происходит с прошиванием током проволоки по длине, что приводит к току дугового разряда (рис. 4, в). Такое разделение вызвано величиной отношения энергии сублимации W_c к работе выхода электрона W_3 (табл. 4).

Попадание во вторую группу, $W_c/W_3 > 1$, означает, что прежде, чем в проволоку при электровзрыве будет введена энергия сублимации, термоэмиссия с ее поверхности на пятне контакта микровыступа оказывается настолько большой, что падение напряжения на проволоке оказывается достаточным для зажигания дугового разряда, и дальнейший ввод энергии в проволоку практически прекращается по завершении процесса торможения.

Таким образом, если известны параметры микроцепей L , C и действие h_b , можно выбрать U_0 , сечение и длину проволоки для обеспечения требуемого перегрева для многих металлов, обеспечивая разрядные явления между пятнами контактов микровыступов, и как следствие массоперенос полимерного материала на поверхности пятен микровыступов металлического фрикционного элемента. Такое решение уменьшит взрывные явления в подповерхностных слоях полимерной накладки, что существенно снизит эффект ее электротермомеханического износа.

Выводы. Таким образом, показано что в электрическом поле при фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения в подповерхностном слое накладки доминирует электрический взрыв, после которого наблюдается электрический разряд. В тепловом поле доминирует только тепловой взрыв.

Список литературы

1. Лушейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г.А. Лушейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
2. Колесников В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В.И. Колесников. – М.: Наука, 2003. – 279 с.
3. Anderson G.W., Neilson E.W. Use of the action integral in exploding wire studies. / G.W. Anderson, E.W. Neilson. In Chace, W.G. & H.K. More (eds.), Exploding Wires. Vol. I. Proc. of 1st Conf. on the Exploding Wire Phenomenon, Boston, USA, 24-27 March. 1959. Plenum Press. New York. P.97-103.
4. Rudenberg R. Transient Perfomant Electric Power Systems / R. Rudenberg. New York – Toronto – London. 1950.
5. Лурье А.И. Электрическое взрывание зарядов / А.И. Лурье. – М., Уралтехиздат, 1957.
6. Snare E.C. & F.W. Neilson. Large exploding wires-correlation to small wires and pause time versus length dependency. // E.C. Snare & F.W. Neilson. Chace, W.G. & H.K. More (eds.), Exploding Wires. Vol. I. Proc. of 1st Conf. on the Exploding Wire Phenomenon, Boston, USA, 24-27 March/ 1959. Plenum Press. New York. P.83-96.

7. Чемезова Л.И. Моделирование и инженерный расчет электрического взрыва проводников из разных металлов: – дисс. ... канд. техн. наук / Людмила Игоревна Чемезова. Ин-т сильноточной электроники СО РАН. Томск. 1987.
8. Джанахмедов А.Х. Нефтяная трибология / А.Х. Джанахмедов. –Баку: Элм, 2003.–326 с.
9. Джанахмедов А.Х. Триботехнические проблемы в нефтегазовом оборудовании / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 1998. – 216 с.
10. Чичинадзе А.В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / А.В. Чичинадзе, В.Я. Белоусов, И. М. Богатчук. – Львов. – Вища школа, 1989. – 144 с.
11. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989.–510 с.
12. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография (научное издание) в 2 т. Т.2 / [Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Крыштопа, Д.Ю. Журавлев, А.В. Возный]. – Кубанск. госуниверситет. технолог. ун-ет. – Краснодар – Ивано-Франковск, 2013. – 441 с.
13. Джанахмедов А.Х. Темпы нагревания металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты трения в ленточно-колодочном тормозе [А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко и др.] // Проблемы трения и износа: научн. – техн. сб. – К.: НАУ, 2013. –Вып. 2(61). С. 20 – 28.
14. Snare E.C. Observation on the striations of electrically exploded copper foils. / E.C. Snare. J. Appl. Phys. 1966. V. 32. P.1043-1044.
15. Kotov Yu. A. Azarkevich E.I., Beketov I.B., Demina T.M., Murzakaev A.M. and Samatov O.M. Producing Al and Al₂O₃ Nanopowders by Electrical Explosion of Wire / Yu. A. Kotov, E.I. Azarkevich, I.B. Beketov, T.M. Demina, A.M. Murzakaev and O.M. Samatov Key Engineer. Materials, Trans. Tech. Public., Switzerland. 1997. V. 132–136. P. 173–176.
16. Oktay E. Effect of wire cross section on the first pulse of an exploding wire / E. Oktay. Rev. Sci. Instr. 1965. V. 36. P. 1327–1328.
17. Sherman P.M. Generation of submicrom metal particles. / P.M. Sherman. J. of Colloid and Interface Sci. 1975. V.51. P.87–93.
18. Лернер М.И. Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников: дисс. ... канд. техн. наук / Михаил Ильич Лернер. Политехнич. Инс-т. Томск. 1988.
19. Котов Ю.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников / Ю.А. Котов, Н.Я. Яворовский. // Ж. Физика и химия обработки материалов. 1978. №4. –С.24–29.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2014

Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ

ФІЗИЧНІ ЯВИЩА В МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАРАХ ТЕРТЯ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА

Розкриті явища виникнення і розвитку електро- та теплорозриву у приповерхневому шарі полімерної накладки, а також розрядного явища, який пробиває шар між мікровиступами накладки.

Ключові слова: полімерна накладка, металевий фрикційний елемент, мікровиступи, пляма контакту, фрикційна взаємодія, електричне та теплове поле, електричний та тепловий вибух, електричний розряд.

D. Y. ZHURAVLEV

PHYSICAL EFFECTS IN METAL-POLYMER FRICTION PAIRS OF BAND-BLOCK BRAKE

The article reveals the phenomena of the emergence and development of the electric and thermal explosions in the subsurface layer of the polymer straps and the discharge phenomenon which breaks the layer between the microprojections of the strap.

Keywords: polymer strap, metal friction element, microprojections, contact patch, friction interaction, electric and thermal fields, electric and thermal explosions, electric discharge.

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри механіки машин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.