УДК: 621.81: 621.89

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

© Норик Галустович Меликсетян, Арсен Нагапетович Карапетян, Вильям Володяевич Сароян, Карине Валиковна Оганесян

Национальный Политехнический Университет (НПУА), Ереван,Армения
n_meliksetyan@mail.ru, ars.karapetyan@yahoo.com

Аннотация. *Приведен анализ основных направлений исследования в области трибологии в НПУА. Представлены характеристики созданных тормозных фрикционных материалов, антифрикционных полимерных и смазочных композитов. Разработаны рекомендации по созданию и исследованию деталей машин из антифрикционных и фрикционных композиционных материалов на полимерной основе, а также смазочных масел узлов трения с использованием местного сырья и минералов. Установлены основные закономерности трения и изнашивания поверхностных слоев композиционных материалов фрикционного и антифрикционного назначения.*

Ключевые слова: *тормозной фрикционный материал, антифрикционный композит, смазка, коэффициент трения, износостойкость.*

MAIN REGULARITIES OF FRICTION AND WEAR OF COMPOSITES AND LUBRICANTS

N.G. Meliksetyan, A.N. Karapetyan, W.V. Saroyan, K.V. Hovhannisyan

National Polytechnic University, Yerevan, Armenia
n_meliksetyan@mail.ru, ars.karapetyan@yahoo.com

Abstract. *The analysis of the main directions of the investigation of tribology in NPUA is provided. The characteristics of the developed brake friction materials, antifriction polymer and lubricant composites are presented. The recommendations on the creation and study of machine parts from antifriction and friction composite materials based on polymers using local raw materials and minerals as well lubricants of friction units are developed. The basic laws of friction and wear of the surface layers of antifriction and friction composite materials are established.*

Keywords: *brake friction material, antifriction composite, lubricant, coefficient of friction, wear resistance.*

Введение. Наряду с техническим прогрессом все шире и целенаправленно развивается трибология – наука о трении, износе, смазке и сопутствующих процессах и явлениях при взаимодействии сопряженных поверхностей трущихся тел.

В деле развития трибологии ведущую роль в республике играет созданный в 1974г. под руководством члена-корреспондента НАН РА, профессора А.К. Погосяна Армянский комитет по трибологии, который с 1997г. является членом Международного совета по трибологии (ITC). В рамках международного сотрудничества комитет поддерживает также тесную связь с Американским обществом инженеров механиков (ASME - с 2003г.), Международным

координирующим комитетом департамента по трибологии (TD ICC - с 1997г.), Всемирным советом по трибологии (WTC - с 2001г.), редакционной коллегией международного научного журнала «Трение и износ» и т.д. В результате многолетних фундаментальных и прикладных исследований в НПУА сформировалась одна из известных в РА и за ее пределами научных школ в области трибологии [1].

Результаты исследования. Обобщение результатов целенаправленных исследований по расчету и проектированию деталей и узлов трения машин из композиционных полимерных материалов вместо традиционных металлических, предложение разработанных расчетных методов и изучение механики фрикционного взаимодействия композиционных тормозных фрикционных и самосмазывающихся материалов, а также прикладное применение процессов фрикционного переноса представляют новое научное направление в РА по созданию композиционных полимерных материалов, а также деталей машин и узлов трения на их основе. Работы по исследованию трения полимерных композитов представлены в Большой советской энциклопедии (Т. 24, кн. 2) и изложены в Международной энциклопедии по трибологии (Encyclopedia of Tribology, New York, Springer Science, 2013).

Безасбестовые тормозные фрикционные материалы. Безасбестовые фрикционные материалы порядка 20 лет успешно используются в тормозных устройствах автотранспортных средств, подъемно-транспортных машин, кузнечно-прессового и нефтеперерабатывающего оборудований и многих других фрикционных устройств. При создании новых более эффективных и экологически безвредных тормозных фрикционных материалов (ТФМ) возникает необходимость решать ряд сложных проблем, связанных с поиском и выбором оптимального сочетания наполнителей и полимерных связующих, подбора технологического оборудования и технологии изготовления, выбора конструкции элементов пар трения и др. с учетом теоретических разработок и экспериментальных данных о поведении ТФМ в различных условиях эксплуатации. Решения этих проблем неразрывно охватывают области трибологии.

Обзор технической литературы и опыт эксплуатации тормозных устройств показывает, что существующие основные теоретические и прикладные разработки в области ТФМ и практические применения основываются на результаты исследований тонкого поверхностного слоя (так называемые «рабочий слой», «третье тело», «слой вторичных структур» и др.) наиболее «слабого» элемента пары трения, в котором происходят основные изменения материала. Без исследования и выявления основных закономерностей существования и трансформации этих слоев невозможно создание и проектирование новых, в том числе и экологически безвредных ТФМ. В этом аспекте разработка научных принципов создания фрикционных материалов с заданными трибологическими параметрами и управляемыми свойствами на основе комплексного исследования процессов фрикционного взаимодействия материалов пар трения тормозных устройств является важнейшей задачей современного фрикционного материаловедения, имеющей большое научно-практическое значение.

Еще в 1980-х годах совместно с ВНИИАТИ (ТИИР г. Ярославль, РФ) нами проведены комплексные исследования в направлении изучения работоспособности тормозных фрикционных материалов. Установлены основные закономерности высокотемпературного трения и изнашивания поверхностных слоев традиционных композиционных ТФМ [1-4]. Протекающие при трении механохимические изменения имеют многостадийный характер и

начинаются при сравнительно низких температурах. Высокотемпературное трение фрикционных материалов протекает в многостадийном режиме механохимических изменений, сопровождающемся низкомолекулярным весовым пиролизом летучих продуктов, деструкцией связующего, деградацией армирующего элемента и карбонизацией поверхности трения. Существует общая закономерность механохимических изменений в поверхностных слоях ТФМ, которые, в целом, определяют толщину поверхностного рабочего слоя и являются постоянно действующими факторами (рис.1).

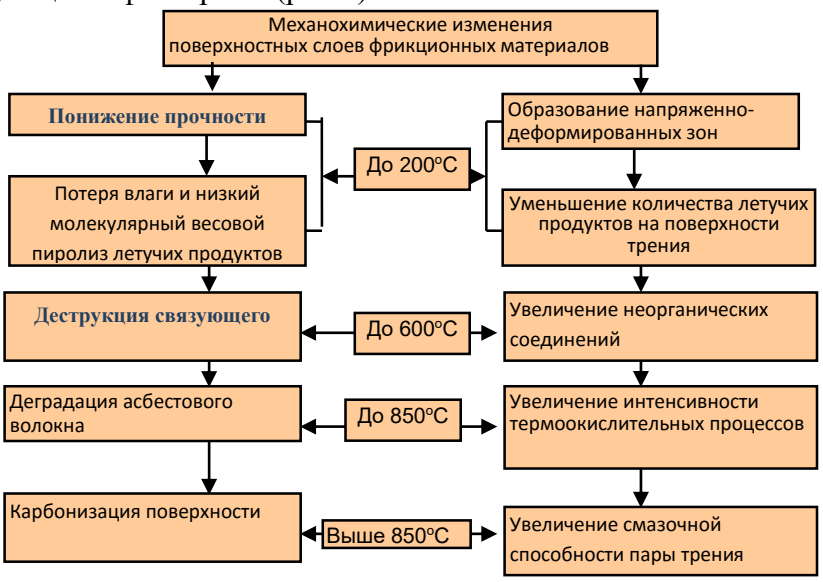


Рис.1. Функциональная схема механохимических изменений поверхностных слоев ТФМ

Установлены основные механизмы структурных изменений поверхностных слоев трения ТФМ и выявлена взаимосвязь температурных зон коэффициента трения и интенсивности изнашивания со структурными и фазовыми изменениями. ТФМ, как правило, работают в условиях повышенных температур, генерируемых в процессах стационарного и повторно-кратковременного трения. При этом на поверхности трения образуется слой фрикционного переноса и с увеличением нагрузки, скорости и времени (фактически температуры) толщина этой пленки возрастает. Для достижения низкой интенсивности изнашивания по результатам исследований требуется формирование достаточно толстой (до 5...7 мкм) монолитной пленки переноса [1]. Следует отметить, что большинство ТФМ способны образовывать на поверхности трения контртела пленку фрикционного переноса в виде монолитного слоя или отдельных перенесенных фрагментов, ориентированных по направлению скольжения [1]. Способность образования пленки фрикционного переноса является важной характеристикой фрикционной пары. Вновь разрабатываемые ТФМ должны образовать пленку фрикционного переноса на поверхности контртела при сравнительно высоких температурах, в область которых смещаются максимальные значения коэффициента трения.

В результате теоретико-экспериментальных исследований нами выявлен основной механизм высокотемпературного изнашивания ТФМ и на его основе разработаны физическая модель разрушения поверхностного слоя (рис.2).

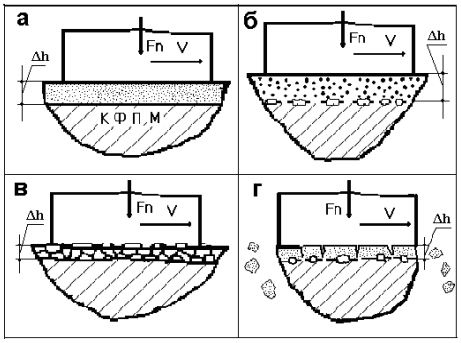


Рис.2. Физическая модель разрушения поверхностного слоя ТФМ: а-образование рабочего слоя, отличающегося по свойствам от основного материала; б-зарождение и распространение подповерхностных трещин; в-усталостное растрескивание рабочего слоя; г-образование тонких удлиненных продуктов износа

Установлено, что работоспособность фрикционных материалов в условиях высокотемпературного трения определяется напряженно-деформированным состоянием тонких поверхностных слоев, в которых действуют превышающие предел прочности при срезе растягивающие и сжимающие напряжения. Механизм высокотемпературного разрушения поверхностных слоев ТФМ характеризуется аккумуляцией повреждений в подповерхностном слое и наиболее полно процесс высокотемпературного изнашивания объясняется концепциями усталостно-деламинационного разрушения поверхностей трения [5].

Объяснить процесс образования продуктов износа, основываясь только на механохимические изменения не представляется возможным. Располагая определенной термодинамической активностью, продукты износа могли бы и дальше поглощать определенную теплоту на поверхности трения, однако они экструдируются из зоны фрикционного контакта в результате разрушения рабочего слоя под воздействием поверхностных напряжений, превышающих предел прочности материала при срезе. Разработку новых ТФМ с заданными трибологическими параметрами и управляемыми свойствами рационально проводить двумя методами:

- регулированием протекающих механохимических и структурных изменений их смещением в область более высоких температур с помощью ввода в композиционный состав разрабатываемого материала армирующих веществ и специальных наполнителей;
- управлением напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на основании предварительного прогнозирования и оценки энергетической интенсивности изнашивания.

Учет этих двух факторов является необходимым условием при научно обоснованном выборе наполнителей, армирующих веществ и полимерных связующих для создания ТФМ с заданными трибологическими параметрами и управляемыми свойствами.

Эти исследования открыли новые перспективы для создания более работоспособных и, главное, экологически безвредных ТФМ. В результате исследований были разработаны новые безасбестовые ТФМ под общим названием Бастенит на основе комбинированных связующих, армирующих волокон из минералов армянского месторождения (базальтовые и стеклянные волокна) и фрикционных добавок [3-4]. Свойства и области применения материалов типа Бастенит представлены в табл.1.

Предложенный подход создания безасбестовых ТФМ путем регулировки температурных зон механохимических изменений реализован при сотрудничестве с фирмами Razmehr Ltd. (г. Хорамабад, Иран), ООО «Бастенит» и ООО «Оптимакс» (г. Новосибирск, РФ), а также с филиалом ОАО РЖД «Восточно-Сибирская Железная Дорога» (г. Иркутск, РФ) с целью внедрения материалов типа Бастенит в тормозах легковых автомобилей и железнодорожных вагонов.

Таблица 1

Свойства и области применения материалов типа Бастенит

Свойства	Фрикционные материалы Бастенит								
	Б-1 а.с. СССР 966105 1982	**Б-2** а.с. СССР 1142488 1985	**Б-3** а.с. СССР 1224321 1986	**Б-4** а.с. СССР 1094331 1984	**Б-5** Патент РФ 2260018 2005	**Б-6** Патент РА 753 1999	**Б-7** Патент РА 2394 2010	**Б-8** Патент РА 2782 2013	**Б-9** Патент РА 2909 2015
Коэффициент трения	0,28 -0,36	0,48- 0,6	0,5 - 0,6	0,48-0,56	0,37-0,45	0,38-0,5	0,36…0,56	0,38…0,58	0,37…0,6
Износ, х10-5 г/Дж	0,92 –1,08	1,85 –2,15	1,85– 2,1	1,8 – 2,2	1,85-2,3	1,82-2,2	1,8…2,1	1,7…2,0	1,6…1.9
Максимальная поверхностная температура, ^{0}C	600	600	700	700	750	750	780	820	820
Максимальная объемная температура, ^{0}C	250	350	400	400	450	450	470	490	490
Максимальное удельное давление, МПа	4	6	8	12	12	12	13	14	14
Максимальная скорость скольжения, м/с	22	28	32	36	36	36	36	42	42
Области применения	Подъемно транспорт машин	Транс-портные средства, кузнечно-прессовое оборудов.	Автомобили, подъемно-транспортные машины и кузнечно-прессовое оборудование		Тракторы, автомобили, железнодорожный транспорт				

Фрикционные накладки из материалов Бастенит –5 (патент РФ N 2260018) для дисковых тормозов автомобилей ВАЗ представлены в соответствующий Орган по сертификации автомобильных изделий – НАМИ-ФОНД (г. Москва) и по результатам сертификационных испытаний (рис.3) выдан Сертификат соответствия № РОСС RU. МТ14.В12040. Разработаны и утверждены технические условия ТУ 4591-002-14389312-2003-04-24 «Колодка с фрикционной накладкой для дискового тормоза автомобиля ВАЗ» и ТУ 2579-001-14389312-2003 «Материал формовочный Бастенит».

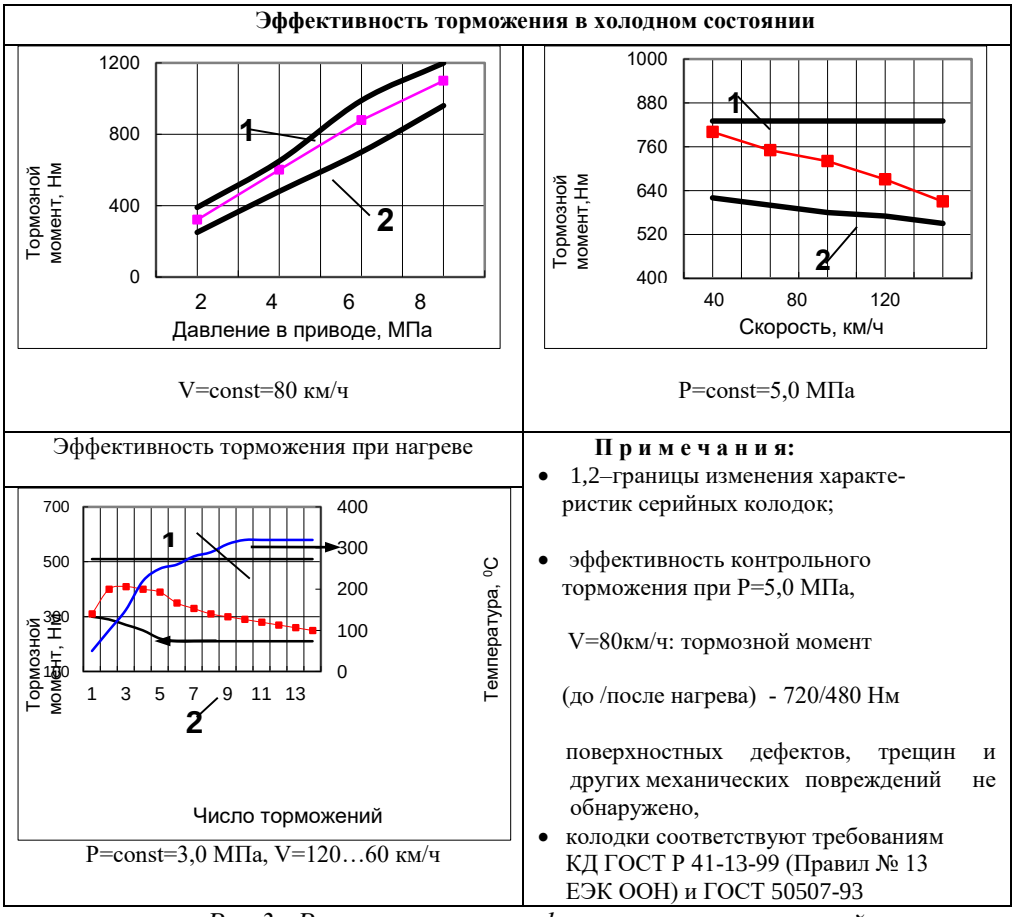


Рис.3. Результаты сертификационных испытаний

Возможность применения минералов армянского месторождения в композиционных составах взамен асбеста кроме положительного экологического результата обеспечивает значительный экономический эффект и дает основание предполагать, что организация производства экологически безвредных ТФМ в нашей республике обеспечит ее приоритет не только в регионе, а далеко за его пределами.

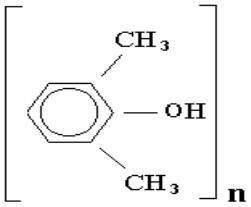
Антифрикционные полимерные композиции. В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что при трении и изнашивании антифрикционных термопластичных полимерных материалов происходят различные трибохимические процессы, оказывающие существенное влияние на физико-механические и трибологические свойства материалов. Такие процессы являются чаще всего деструкцией или структурированием полимерного связующего, реже обнаруживается образование новых химических соединений. Понимание характера этих процессов представляет большой научный интерес для целенаправленного создания новых износостойких композиционных самосмазывающихся полимерных материалов [6-9]. В связи с этим, представляет значительный интерес проведение комплексного исследования трибохимических процессов, происходящих при трении в поверхностных слоях гетероцепных полимеров методами структурной трибомеханики [10].

Исходя из поставленных задач, для создания композиционных самосмазывающихся полимерных материалов (КСПМ) в качестве объектов исследования были выбраны термопластичные гетероцепные полимерные материалы антифрикционного назначения многотоннажно выпускаемые промышленностью: сополимер формальдегида с диоксоланом (СФД), алифатические полиамиды (ПА-6, ПА-66), а также полифениленоксид (ПФО),

структурные формулы и основные физико-механические свойства которых приведены в табл.2.

Таблица 2

Структурные формулы исследуемых гетероцепных материалов

Материал	Строение звена
СФД	$CH_2 – (O – CH_2)_n – O (CH_2 – CH_2)_m – O – CH_2OH$
ПА-6	$[– NH – (CH_2)_5 – CO –]_n$
ПА-66	$[NH – (CH_2)_6 – NH – CO – (CH_2)_4 – CO]_n$
ПФО	

Результатами исследований было установлено, что низкие трибологические свойства СФД при относительно высоких скоростях скольжения (V >1.0 м/с) связаны с особенностями трибохимических процессов, происходящих на поверхностях трения контактирующих материалов. Анализ поверхностных слоев СФД методом ИК-спектроскопии показал (рис. 4), что в ИК-спектрах до трения присутствует интенсивная полоса поглощения в области 1050 $см^{-1}$, соответствующая валентным колебаниям связей С-О-С полиформальдегида (кривая 1). После трения, даже при сравнительно низкой скорости (V=1,0 м/с) наблюдается уменьшение интенсивности этой полосы и появление полосы поглощения в области 1720 $см^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям карбонильной групы (С=О), что свидетельствует о трибоокислении СФД.

Результаты ИК-спектроскопии поверхностных слоев СФД при более высокой скорости скольжения (V=1,0 м/с) свидетельствуют об усилении окислительных процессов (кривая 3). Следовательно при высоких скоростях скольжения СФД протекают трибоокислительные процессы, сопровождающиеся распадом макромолекул с образованием карбонильных соединений, что способствует значительному росту износа материала.

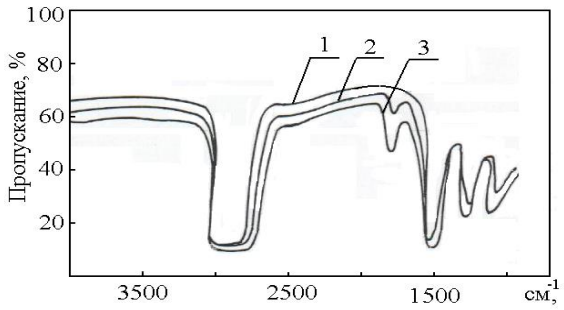


Рис. 4. ИК- спектры поверхностных слоев СФД: 1- до трения; 2 и 3 –после трения при скоростях 1,0 и 1,5 м/с, соответственно

Исследование поверхностного слоя СФД методом термогравиметрии и ДТА показало (рис.5, кривые 1,2 и 3,4), что в исходном образце (кривая 3) наблюдается два эндотермических пика при температурах 170 и 295°С соответственно. При исследовании поверхностного слоя в более жестких условиях трения (V=1.5 м/с) можно отметить смещение эндотермических эффектов и сдвиг начала потери массы в область более низких температур (кривые 4 и 2). Это может свидетельствовать о наличие низкомолекулярной фракции в поверхностных слоях. Появление экзотермического пика при 280 °С говорит о значительном изменении химической природы материала, вызванном трибовоздействием в жестких условиях трения.

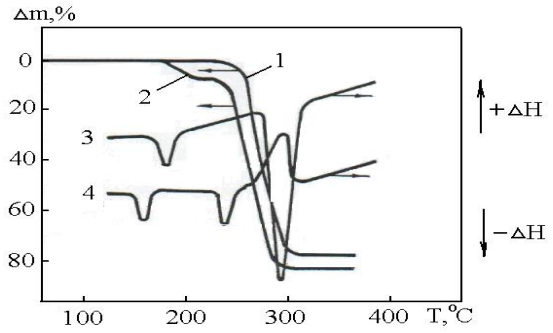


Рис. 5. Кривые ТГА (1, 2) и ДТА (3, 4) поверхностых слоев СФД: 1 и 3 - до трения; 2 и 4 - после трения при V=5м/с и P_a=0,2 МПа

Для дальнейшего изучения трибохимических процессов, происходящих в поверхностных слоях СФД, было произведено масс-спектрометрическое исследование этих слоев до и после 6 часов трения путем термического разложения в масс-спектрометре MS-30. Продукты термо- и трибодеструкции СФД приведены в табл.3.

Таблица 3

Продукты термо- и трибодеструкции СФД

Ион, m/z	Структура соединения
29	- CH - O
30	- CH_2 - O
31	- CH_2 - OH
44	- CH_3 - O - CH
45	- CH_3 - OH - CH
100	CH = CH_2 - O - CH_2 - OCH = CH_2
104	OH - $(CH_2 - O)_2$ - CH = CH_2
177	-CH_2- O - $(CH_2 - O)_4$ - CH = CH_2

Анализ продуктов деструкции, зарегистрированных в спектрах, свидетельствует о том, что распад полимера происходит в основном с образованием мономолекулярных продуктов (m/z 29, 30, 31), накопление которых связано с деструкцией оксиметиленовых фрагментов СФД. В спектре также зарегистрированы продукты m/z 44, 45, характерные для распада

оксиэтиленовой структуры. Имеющиеся в спектре ионы m/z 100, 104, 164, 177 могут быть приписаны низкомолекулярным фрагментам цепи макромолекулы. Максимальный выход летучих продуктов (% от полного ионного тока) наблюдается при 200-250°С. При анализе поверхностного слоя СФД после 6 часов трения можно отметить смещение интенсивного газовыделения в сторону более низких температур, а также увеличение количества m/z 29 и m/z 30 по сравнению с исходным образцом.

Это свидетельствует об образовании в процессе трения "вторичной" структуры, содержащей низкомолекулярные продукты, при разложении которых в условиях масс-спектрометрического анализа наиболее вероятен процесс деполимеризации. Наряду с этим можно отметить значительное снижение интенсивности образования ионов m/z 31, что может быть связано с особенностью протекания деструкции низкомолекулярных продуктов, при которой наблюдается уменьшение количества выделяющихся метилольных фрагментов (-CH_2-OH). В то же время интенсивность образования продуктов m/z 44 и 45, характеризующих распад оксиэтиленовых фрагментов, сохраняется на уровне исходного продукта, что может быть связано с большей устойчивостью к деструкции в условиях трения структур, содержащих алифатические фрагменты с количеством –CH_2- групп больше единицы между атомами кислорода в простых полиэфирах. Характер выделения ионов вышеуказанных продуктов представлен на рис.6.

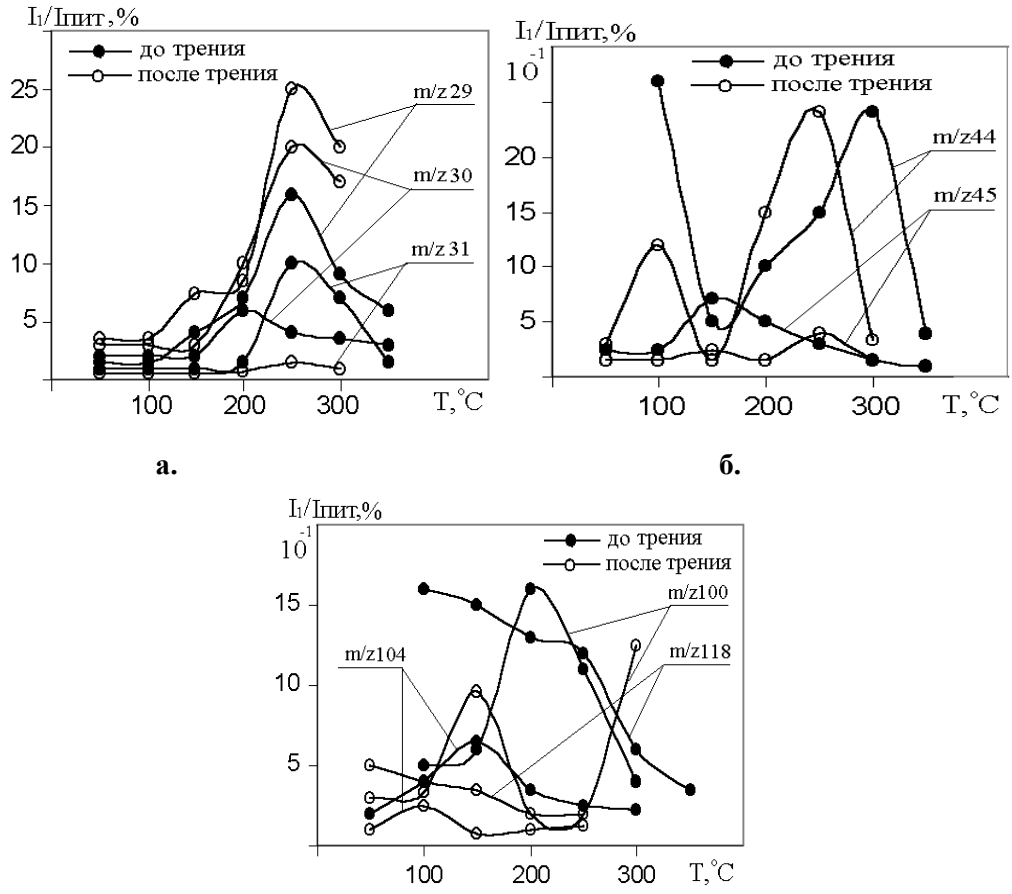


Рис. 6. Кинетика выделения основных продуктов термодеструкции m/z 29,30,31 (а), m/z 44,45 (б), а также m/z 100,104,118 (г) до и после трения сополимера СФД в камере масс-спектрометра

Для выявления природы трибохимических процессов, происходящих в поверхностных слоях СФД, было проведено исследование образцов на установке, размещенной в близости к области ионизации. Результаты исследования процесса трения образцов в течение 30 мин непосредственно в камере масс-спектрометра при скоростях 0.2 и 0.6 м/с свидетельствуют о протекании активных трибохимических процессов, приводящих к значительному выделению продуктов деструкции, особенно в начальный период трения (5…10 мин). Набор продуктов аналогичен по составу продуктам термораспада (табл. 3), что свидетельствует о сходной природе данных процессов.

Показано, что основными продуктами трибодеструкции СФД в выбранных условиях трения являются ионы m/z 29 и 30, что свидетельствует о деполимеризации оксиметиленовых фрагментов. Обращает на себя внимание, что при малых скоростях трения (V=0.2 м/с) наблюдается сравнительно высокая интенсивность выделения продуктов, относящихся к оксолановым участкам, находящимся в полимере в соотношении к оксиметиленовым как 1:30. При трении в мягких условиях отношение интенсивностей суммы пиков ионов, характеризующих оксолановый фрагмент к оксиметилену (m/z 44,29,30) составляет 1:3 (кривые I и 2 на рис.6). Можно предположить, что в мягких условиях трибохимические процессы протекают в значительной степени по оксолановым участкам цепи, находящимся в аморфной, дефектной фазе структуры сополимера [6-9]. При более жестких условиях фрикционного взаимодействия, когда снижаются теплофизические и физико-механические свойства полимерной поверхности, интенсивность деполимеризации с выделением продуктов m/z 29, 30 заметно усиливается (соотношение m/z 44 / m/z 29,30 = 1:6) (кривые 3 и 4 на рис.7).

Описаннный выше механизм трибораспада в более жестких условиях приводит к образованию в поверхностных слоях "вторичной" структуры, содержащей, в основном, низкомолекулярные продукты, которые более легко подвергаются дальнейшей деструкции с переходом в газовую фазу в условиях масс-спектрометрического анализа. Об этом свидетельствует значительное увеличение, по сравнению с исходным образом, интенсивности выделения продуктов с m/z 29, 30. Наблюдаемые трибохимические процессы приводят к значительному изменению микротвердости поверхностных слоев СФД по сравнению с исходным значением (рис.8). Поверхностный слой сополимера после трения разрыхляется, о чем свидетельствует значительное уменьшение его микротвердости (от 180 до 100…150 МПа) в зависимости от продолжительности трения, приводящей к большому износу материала. Глубина измененного слоя в условиях испытания составляла примерно 10…14 мкм.

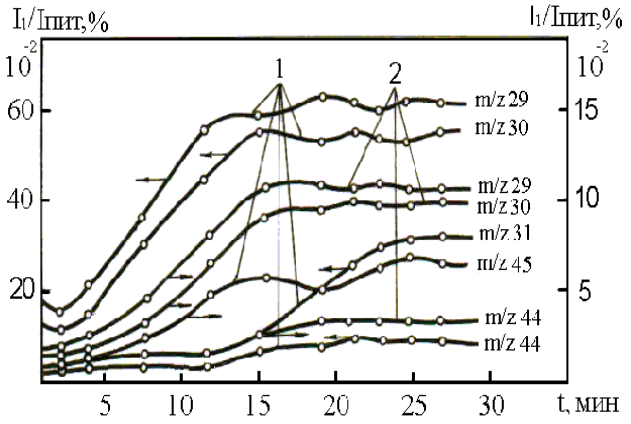


Рис.7. Кинетика выделения основных продуктов трибодеструкции при трении образца из сополимера СФД в камере масс-спектрометра: 1 и 2 при скоростях 0.6 и 0.2 м/с, соответственно

С помощью электронной микроскопии установлено, что при трении сополимера СФД на поверхности контртела образуются тонкие пленки фрикционного переноса, обладающие малой адгезионной прочностью. При повторных скольжениях с V >1.0 м/с эти пленки непрерывно удаляются с поверхности трения и формируются вновь, что приводит к сравнительно большому износу.

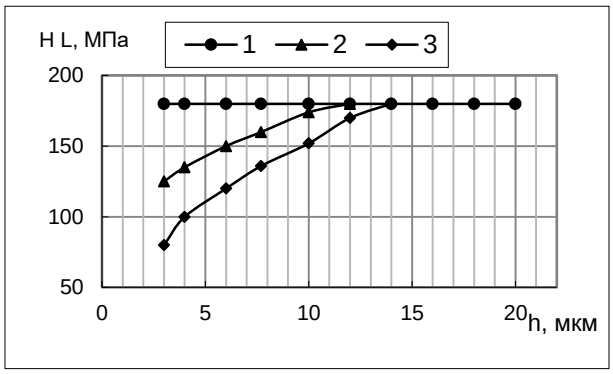


Рис.8. Зависимости микротвердости от глубины поверхностного слоя сополимера СФД при различной продолжительности трения:

1- исходный образец; 2 и 3- после 20 и 60 мин трения, соответственно

Таким образом, характер трибохимических процессов при трении СФД связан с явлением деполимеризации, причем при повышении скорости скольжения, когда подвижность надмолекулярных образований возрастает, интенсивность деполимеризации оксиметиленовых участков макромолекулы сополимера по сравнению с оксолановыми повышается, что способствует ухудшению физико-механических свойств "вторичной" структуры и повышению износа.

Смазочные материалы. В условиях эксплуатации тяжелонагруженных узлов трения (рост удельных нагрузок и скоростей скольжения, повышение температуры) важнейшей задачей является предотвращение процессов схватывания и заедания отдельных ювенильных участков трущихся поверхностей. В присутствии присадок такие режимы трения в основном обусловлены химическими и физическими процессами, происходящими на поверхности металла, благодаря которым имеет место явление модификации тонкой поверхностной

пленки. Повышение температур микроучастков поверхности при трении ускоряют химические реакции присадок с металлом и на поверхности металла возникают соединения, образующие заащитные пленки, которые имеют низкую сопротивляемость сдвигу и поэтому препятствуют схватыванию и заеданию контактирующих поверхностей. Процесс образования защитных слоев и их свойство изолировать трущиеся поверхности, как правило, не зависит от свойств базового масла и в основном предопределяется химической природой присадок [11]. Из класса галогенсодержащих химических органических соединений испытывались как известные, так и новые присадки разных функциональных назначений [12-13], характеристики которых приведены в табл. 4.

Рассматривались разные представители галогенсодержащих химических органических соединений трех разных классов: азотсодержащие циклические эпоксисоединения, циклические эфиры органических кислот и циклогексаны. Основные экспериментальные трибологические результаты представлены в табл. 5.

Соединения первой группы при использовании в качестве присадок в масле ВМ-1 имеют высокую активность модификации трущихся поверхностей, что проявляется в повышении противозадирных и противоизносных свойств даже в условиях отсутствия в молекуле присадки активных атомов (табл. 1, соединение 1). По сравнению с базовым маслом, нагрузка заедания *Рк* и индекс задира *Qз* возрастают, соответственно в 1.8 и 1.3 раза, а коэффициент интенсивности изнашивания α снижается в 2.3 раза. Наличие двух атомов хлора в присадке (соединения 2 и 3), независимо от места их расположения, сопровождается ростом *Рк* и *Qз,* соответственно в 3.3 и 2 раза и понижением α в 8…10 раз. В этом случае на пятнах износа отсутствуют повреждения в виде глубоких царапин, что является результатом антикоррозионного действия азота, содержащегося в молекуле данного соединения.

Таблица 4

Характеристики химических органических соединений, применяемых в качестве присадок

Струк-тура	Группа	№	Наименование	Общая структурная формула
Циклическая	I	1	Аминоэпоксисоединение-3, N, N-диэтиламин-1- (2 циклогексенил)	C13H25ON
		2	7.7-дихлор-5-(3- диэтиламин-1.2- -эпоксипропил)-норкаран	C13H23ONCl2
		3	1-пиперидино-4-(1 метил-2.2- -гем.дихлорциклопропил)-2.3-эпоксибутан	C11H22ONCl2
	II	4	ди-(трихлорамиловый) эфир тетра-гидрофгалевой кислоты	C14H12O4Cl4
		5	ди-(тетрахлорпропионовый) эфир тетрагидрофгалевой кислоты	C14H14O4Cl8
		6	ди-(тетра хлорпропиловый) эфир хлорэндиковой кислоты	C9H6O4Cl13
	III	7	1-(3.4-дибромциклогексан-1-карбоналокел)-1-хлорметил-2-хлорэтан	C10H14O2Cl2Br2
		8	трихлорацетоксиэтил-3.4-дибром циклогексан-1-карбоксилат	C11H13O4Cl3Br2
Алифати-ческая	-		3-4-дихлорбутэн-2 (ДХБ)	C4H6Cl2
			1-2-дихлорэтан (ДХЭ)	C2H4Cl2
			2-дихлор, 4-хлор, каприлет (ДХК)	C8H12O2Cl3Me
			Катамин АБ-14 (К-АБ-14)	C23H47NCl

В соединениях второй группы атомы хлора отсутствуют в цикле и по этой причине весь процесс модификации трущихся поверхностей происходит только за счет атомов хлора, расположенных в линейной части молекулы присадки. Так, в молекуле 5-го соединения, по причине наличия более подвижной группы CCl3, нагрузка заедания по сравнению с соединением 4-ой группы (молекула которой содержит меньшее количество менее подвижных атомов хлора) возрастает на 40%. Для следующей, 6-ой группы, также следовало ожидать подобного воздействия трихлорметильной группы высокой активности, однако здесь очевидно сказывается также влияние атомов хлора, расположенных в цикле молекулы присадки. В результате эти две группы активных атомов действуют в противоположных направлениях, что приводит к некоторому снижению нагрузки заедания.

Таблица 5

Трибологические характеристики новых композитных смазок с применением циклических органических соединений разных классов

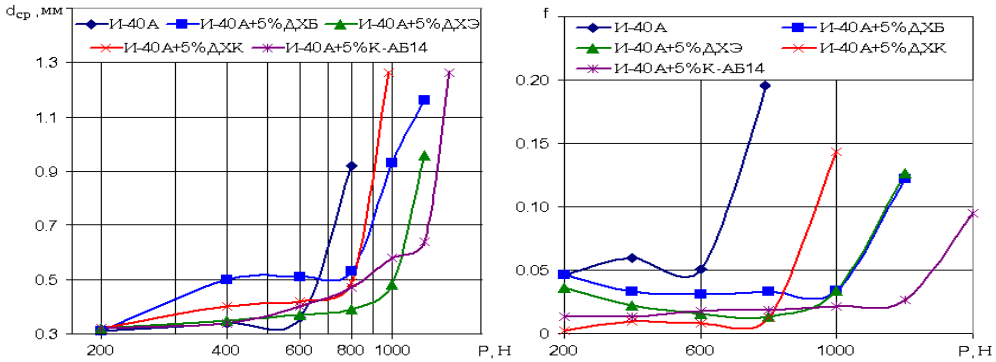
Характеристика	Базовое масло	Соединения циклической структуры							
		I			II			III	
		1	2	3	4	5	6	7	8
Нагрузка заедания Рк, Н	(ВМ-1) 750	1350	2400	2500	-	-	-	-	-
	(С-220) 900	-	-	-	1500	2100	1800	2500	2200
Индекс задира Qз	(ВМ-1) 66.08	87.19	123.65	126.82	-	-	-	-	-
	(С-220) 69.75	-	-	-	88.84	123.24	102.73	142.6	119.38
Коэффициент интенсивности изнашивания $\alpha \times 10^{-3}$, $м^{-1}$	(ВМ-1) 28.95	12.95	3.57	2.95	-	-	-	-	-
	(С-220) 21.90	-	-	-	6.08	2.64	2.88	2.15	2.25

Соединения третьей группы также наделены противозадирными и противоизносными свойствами, что, с одной стороны, обусловлено воздействием атомов брома, расположенных в цикле молекулы, а с другой – активностью атомов хлора, расположенных в линейной части молекулы присадки. Учитывая структурные особенности 7-го соединения, где атомы брома сравнительно более подвижны, чем атомы хлора, при трении под сравнительно низкими нагрузками образование защитных слоев трущихся поверхностей обусловлено атомами брома, а при более высоких нагрузках – воздействием атомов хлора. Такая очередность воздействия способствует повышению нагрузки заедания в 2.8 раза. Наряду с этим, одновременное наличие подвижной группы трихлорметила в линейной части с подвижными атомами брома в цикле молекулы 8-го соединения, нарушает вышеуказанную последовательность воздействия атомов брома и хлора, что в конечном итоге приводит к снижению нагрузки заедания.

В результате испытаний выявлено, что общим в механизмах действия всех приведенных соединений на трибологические свойства смазок является наличие в молекулах нескольких атомов галогена, отличающихся по активности, что по мере увеличения удельной нагрузки в

паре трения способствует постепенному разложению присадки, и как следствие - поочередному изменению защитных слоев контактирующих поверхностей. Трибологическая особенность каждого класса соединений обусловлена также молекулярной структурой присадок. Так, если эффективность азотсодержащих циклических эпоксисоединений не зависит от места расположения атомов галогена в молекуле присадки (в цикле или алифатической части), а для циклических эфиров органических кислот достаточно их наличие в алифатической части молекулы присадки, то для циклогексанов обязательным условием высокой эффективности является наличие атомов галогена как в цикле, так и в алифатической части молекулы присадки.

Основные трибологические характеристики новых композитных смазок с применением наилучших галогенсодержащих органических соединений с алифатической структурой приведены на рис. 9.



а б

Рис. 9. Зависимости величины износа dcp (а) и коэффициента трения f (б) от осевой нагрузки Р при испытании присадок с алифатической структурой

Пятипроцентный раствор базового индустриального масла И-40А с новыми присадками алифатической структуры улучшает противозадирные, противоизносные и антифрикционные характеристики смазочных композитов, что обусловлено воздействием существующих в них активных атомов галогена, которые при определенных термических и силовых условиях, взаимодействуя с поверхностью металла, на поверхности последнего образуют защитные слои [14]. Для упрощения условий практического применения лучших присадок и новых композитных материалов на их основе составлена специальная *Карта рецептур*, которая представлена в виде табл. 6. В картотеке обособлены следующие эксплуатационные режимы нагрузки: легкий (до 1000 Н), средний (до 1600 Н) и тяжелый (свыше 1600 Н). Смазочные композиты классифицированы по антифрикционным, противоизносным, противозадирным и антикоррозионным свойствам.

Таблица 6

Карта рецептур применения новых композитных смазочных материалов

Классификация	Режим эксплуатации		
	Легкий	Средний	Тяжелый
Антифрикционный	*И-40А+1%ДХБ*	*И-40А+5%ДХЭ, И-40А+5%К-АБ14*	–
Противоизносный	*И-40А+2%К-АБ14*	*ВМ-1+5% соединение 1*	*ОПОК+(4-5)%ТЭА (пластичный)*
Противозадирный	*С-220+1% соединение 4*	*С-220+1% соединение 6, И-40А+5%ДХБ, И-40А+5%ДХЭ, ОПОК+(4-5)%ТЭА (пластичный)*	*ВМ-1+5% соединение 2, ВМ-1+5% соединение 3, С-220+1% соединение 5, С-220+5% соединение 7, С-220+5% соединение 8, И-40А+5%К-АБ14, 40%ОПОК+60%И-40А+ +0,5% Хлорэф-40, 50%ОПОК+50% И-40А+ +0,5% Хлорэф-40*
Антикоррозионный	–	*И-40А+(1-2)%К-АБ14*	*Композиты с содержанием ОПОК*

Примечание: химические наименования соединений приведены в табл. 4.

Предлагаемые смазочные композиты могут быть успешно применены в узлах трения механизмов и машин, эксплуатируемых в условиях тяжелых режимов граничной смазки. Результаты проведенных исследований позволяют выбрать те оптимальные количества новых присадок в смазке, которые обеспечивают высокие трибологические показатели применяемых смазок.

Выводы. В результате многолетних фундаментальных прикладных исследований Армянского комитета по трибологии, основанного в 1974г. в НПУА под руководством члена-корреспондента НАН РА, профессора А.К. Погосяна, сформировалась одна из известных в РА и за ее пределами научных школ в области трибологии. Учитывая современные требования к трибологии и основываясь на научные и практические достижения в этой области в НПУА, весьма актуальна разработка комплексных машиноведческих, материаловедческих и трибологических мероприятий по созданию и исследованию деталей машин из антифрикционных и фрикционных композиционных материалов на полимерной основе, а также смазочных масел узлов трения с использованием местного сырья и минералов, руководствуясь их практическим применением в узлах трения машин и механизмов различного назначения.

Работа выполнена в рамках научной темы “Создание и исследование деталей машин и фрикционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов” базовой проблемной лаборатории по трибологии НПУА за 2014-2015гг. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Погосян А.К., Меликсетян Н.Г., Меликсетян Г.Н.** Механизм разрушения поверхностных слоев фрикционных тормозных материалов / Межд. конф. по соврем. проблемам механики деформ. твердого тела. Одесса, 2013.- С.105-106.
2. **Погосян А.К., Меликсетян Н.Г.** Трибологические исследования безасбестовых фрикционных материалов / Тр. 3-й межд. конф. по проблемам механики сплошной среды. Ереван, Т.2, 2012.- С.136-139.
3. **А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян и др.** Фрикционные композиты на основе полимеров. -Мн.: Информтрибо, 1992.-218 с.
4. **Меликсетян Н.Г.** Кинетика структурных и фазовых превращений поверхностных слоев тормозных фрикционных материалов // Проблемы механики. - Тбилиси, 2007.- N4 (29).- С. 28-32.
5. **Suh N.P.** An Overview of the Delamination Theory of Wear//Wear. -1974. -V. 44.- pp. 1-16.
6. **В.А Белый, А.И. Свириденок и др.** - Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника,1976.- 431с.
7. Полимеры в узлах трения машин и механизмов: Справочник / **Под ред. А.В. Чичинадзе.-** М.: Машиностроение,1980.- 208 с.
8. **А.К Погосян** Трение и износ наполненных полимерных материалов. - М.: Наука,1977. - 138с.
9. Трибология: Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. **В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина**. - М.: Машиностроение. – 1993.-454с.
10. **А.К. Погосян, А.Н. Карапетян, К.В.Оганесян** Трибохимические процессы и их влияние на фрикционные свойства антифрикцонных полимеров // Тр. Межд. конф. ПОЛИКОМТРИБ-2013.- Гомель, 2013.-С.184.
11. **Погосян А. К., Арустамян Ю. С., Сароян В. В.** Изучение эффективности смазочных композитов. Сборник материалов конф. ГИУА.-Ереван,1998.-С. 103-104.
12. **Погосян А. К., Арустамян Ю. С., Сароян В. В.** Исследование новых химических органических соединений в качестве присадок к смазочным маслам / Межд. симпоз. БЕЛТРИБ-99. Гомель, 1999.- С.105-106.
13. **Pogosian A. K., Arustamyan Yu. S., Saroyan W. V., Gevorgian G. R.** A study of the interaction mechanism of the various organic compositions as additives to lubricating oils / Synopses of the International Tribology Conference. - Nagasaki, 2000.
14. **Арустамян Ю. С., Погосян А. К., Сароян В. В., Геворкян Г. Р.** Исследование различных классов химических органических соединений в качестве присадок // Трение и износ, Т.21, № 3, 2000.- С. 318-322.

Дата поступления статьи: 16 мая 2016 года.