РАЗДЕЛ V. МАШИНОСТРОЕНИЕ

Меликсетян Н.Г., Агбалян С.Г.

Трибологические исследования фрикционных тормозных материалов в Национальном Политехническом Университете Армении

*Национальный Политехнический Университет Армении
(Армения, Ереван)*

doi: 10.18411/scienceconf-06-2021-09

Аннотация

Приведены результаты трибологических исследований фрикционных тормозных материалов в Национальном политехническом Университете Армении. Полученные данные выявляют основные закономерности высокотемпературного трения и износа этих материалов, на основе которых разработаны новые материалы под общим названием Бастенит с использованием базальтовых и стеклянных волокон армянского месторождения. Разработанные материалы Бастенит позволяют стабилизировать фрикционно-износные характеристики пары трения при поверхностных температурах 500-600⁰С, устранить поверхностные дефекты контактирующих деталей и термические трещины металлического контртела, уменьшить износ фрикционной накладки и контртела в 1,8 и 1,6 раза соответственно в условиях наличия влаги во фрикционном контакте, стабилизировать и повысить коэффициент трения в 1,5 раза при 400-600⁰С, защитить поверхность трения контртела от коррозионного и водородного износа.

Ключевые слова: фрикционный тормозной материал, механизм износа, коэффициент трения, безасбестовый фрикционный материал.

Abstract

The results of tribological studies of friction brake materials at the National Polytechnic University of Armenia are presented. The data obtained reveal the main regularities of high-temperature friction and wear of these materials, on the basis of which new materials have been developed under the general name Bastenite using basalt and glass fibers from the Armenian deposit. The developed materials Bastenite make it possible to stabilize the frictional and wear characteristics of a friction pair at surface temperatures of 500-600 ° C, eliminate surface defects of contacting parts and thermal cracks of the metal counterbody, reduce wear of the friction lining and counterbody by 1.8 and 1.6 times, respectively, in the presence of moisture in frictional contact, stabilize and increase the friction coefficient by 1.5 times at 400-600 ° C, protect the friction surface of the counterbody from corrosive and hydrogen wear.

Keywords: friction brake material, wear mechanism, coefficient of friction, asbestos-free friction material.

Еще в 1980-х годах совместно с ВНИИАТИ (ТИИР г. Ярославль, РФ) и ИММС (г. Гомель Беларусь) нами под руководством д.т.н., проф. Погосяна А.К. проведены комплексные исследования в направлении изучения работоспособности тормозных фрикционных материалов. Установлены основные закономерности высокотемпературного трения и изнашивания поверхностных слоев традиционных композиционных фрикционных материалов, в результате чего обосновались конкретные пути для создания более работоспособных и, главное, экологически безвредных фрикционных материалов. [1, 2].

В поисках заменителей асбестового волокна методом термогравиметрического анализа на дериватографе ОД-102 исследовались термохимические свойства различных волокон (рис.1).

Рис. 1. Кривые термogrавиметрического анализа различных волокон масса образцов 25 г скорость нагрева $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Видно, что интенсивное разложение асбестового волокна начинается при температуре 600°C и заканчивается при 800°C , тогда как интенсивное разложение смеси базальтовых и стеклянных волокон начинается при температуре 750°C и заканчивается примерно при 900°C . Этот факт указывает на то, что с применением смеси базальтовых и стеклянных волокон взамен асбестового в качестве армирующего наполнителя, разрушение поверхностных слоев фрикционных материалов при трении должен протекать при сравнительно высоких температурах [3].

Методами дифференциально термического и термogrавиметрического анализов установлено, что протекающие при трении механохимические изменения имеют многостадийный характер и начинаются при сравнительно низких температурах. Существует общая закономерность механохимических изменений в поверхностных слоях фрикционных тормозных материалов, которые, в целом, определяют толщину поверхностного рабочего слоя и являются постоянно действующими факторами (рис.2) [4,5].

Рис. 2. Функциональная схема механохимических изменений поверхностных слоев ТФМ

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что процесс трения фрикционных тормозных материалов в условиях поверхностных температур выше 250-280 °С, по характеру отличается от низкотемпературного трения. При высоких температурах непрерывное многократное фрикционное нагружение интенсивно пластически деформирует поверхностный слой, в котором происходят постоянно действующие термомеханические, механохимические и структурные превращения, процессы фрикционного переноса с образованием лепестковых продуктов изнашивания (рис.3).

Создаются определенные условия для образования микродефектов и зарождения в области их скопления микротрещин. Последние приводят к образованию частиц износа, размеры и частота появления которых определяют интенсивность изнашивания материала. Переход процесса изнашивания материалов от умеренного к интенсивному с одновременным уменьшением коэффициента трения в условиях деструкции связующего, наличие процессов фрикционного переноса и сложное агрегатное состояние поверхности трения фрикционных материалов в температурной зоне, при котором наблюдается повторное повышение коэффициента трения в режиме интенсивного изнашивания указывают на то, что изменяется механизм разрушения поверхностных слоев.

Рис.3. Микрофотографии (x 1000) поверхностей чугунного контртела (а), фрикционного материала (б) и продуктов износа (в). Стрелкой указано направления трения, а в окружности показаны места скопления первичных частиц фрикционного переноса

Доказано, что в процессе разрушения поверхностных слоев определенную роль играет аккумуляция повреждений в подповерхностной зоне. С учетом этого постоянно действующего фактора наиболее полностью явление высокотемпературного изнашивания фрикционных тормозных материалов возможно объяснить, основываясь на концепциях усталостно-деламинационного разрушения поверхностей трения, базирующихся на принципах многократности нагружения и аккумуляции повреждений в подповерхностном слое.

В условиях высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов в тонких поверхностных слоях в направлении трения действуют остаточные растягивающие напряжения, а перпендикулярно направлению трения – сжимающие напряжения. При этом, сжимающие напряжения по абсолютному значению меньше

растягивающих. Такое напряженное состояние поверхностных слоев – следствие их ориентации по направлению скольжения и она приводит к растрескиванию поверхности по направлению трения. Исходя из концепции усталостно-деламинационного механизма разрушения поверхностей трения, рекомендуются эти напряжения определять следующим образом [5, 6]:

$$t_1 = -\frac{1 + \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\gamma}{(1 + \operatorname{tg}^2\beta)^2}, \quad t_2 = -\frac{1 + \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\gamma}{(1 + \operatorname{tg}^2\beta)^2} \cdot \operatorname{tg}\beta,$$

где $t_1 = \pi \cdot \Delta h \cdot \sigma / 2P_a$ и $t_2 = \pi \cdot \Delta h \cdot \tau / 2P_a$ характеризуют зависимости комплексов σ/P_a и τ/P_a от геометрии расположения фрикционного контакта при постоянных значениях Δh , P_a – удельное давление н/м; γ – угол трения, Δh – толщина рабочего слоя, $\operatorname{tg}\beta = x/y$ – относительное расстояние от фрикционного контакта. При коэффициенте трения $\operatorname{tg}\gamma = 0,2 \dots 0,7$ и $\operatorname{tg}\beta = -10 \dots +10$, рассчитывались и исследовались функции t_1 и t_2 (рис.4). Выяснилось, что вне интервала $-3 \dots +3$ функции t_1 и t_2 принимают значения, близкие к нулю, поэтому их следует анализировать только в интервале $-3 \dots +3$.

Рис.4. Результаты исследований функций t_1 и t_2

Следует отметить, что экстремальное значение функция t_1 принимает при $\operatorname{tg}\beta = 0$, т.е. сжимающие напряжения σ наибольшие значения принимают в точках, находящихся на оси вектора P_a . Касательные напряжения τ экстремальные значения принимают приблизительно при $\operatorname{tg}\beta = |0,5|$, что соответствует $\beta_0 = 26^\circ$. Растрескивание рабочего слоя при таком напряженном состоянии происходит при смыкании поверхностных трещин с подповерхностной трещиной в точках, где τ принимает максимальное значение. Это предположение согласуется с результатами, приведенными в работах [6, 7], где, в частности, показано, что угол направления распространения вертикальной трещины, измеренный по отношению к вертикали, изменяется в пределах $0 \dots 20^\circ$ и тенденция к пересечению вертикальной трещины с горизонтальной приводит к разрушению материала поверхностного слоя посредством отслаивания. Остаточные напряжения превышают предел прочности фрикционного материала при срезе. Следовательно, для обеспечения удовлетворительной работоспособности при высоких температурах решающее значение имеют свойства армирующих наполнителей.

Установлены основные механизмы структурных изменений поверхностных слоев трения тормозных фрикционных материалов и выявлена взаимосвязь температурных зон коэффициента трения и интенсивности изнашивания со структурными и фазовыми изменениями (рис.5). [5].

Рис.4. Взаимосвязь коэффициента трения со структурными превращениями

Для создания новых тормозных фрикционных материалов необходимым условием является выявление закономерностей фрикционного взаимодействия элементов пар трения и при этом важными источниками и объектами исследования являются продукты изнашивания. Исследуя их термодинамические свойства, химический и фазовый составы, морфологию и другие свойства, можно составить определенное представление о процессе разрушения поверхностных слоев фрикционных тормозных материалов, выявить механизм изнашивания и разработать методы для создания новых фрикционных материалов.

Проводились исследования продуктов высокотемпературного (выше 450 °C) изнашивания методом дифференциально-термического анализа. Продукты износа выбранных материалов весом 25 мг, образовавшиеся при одном полном цикле испытаний, в нагревательной камере дериватографа ОД-102 нагревались со скоростью 10 °C/мин по программе до 1000 °C. Результаты экспериментальных данных после кубической сплайн интерполяции по программе MathCAD Professional приведены на рис. 5.

Рис.5. Кривые дифференциально-термического анализа продуктов износа после кубической сплайн интерполяции

Экзотермический характер кривых показывает, что при нагреве продукты износа отличаются выделением тепла. Это, в свою очередь, указывает на то, что продукты износа находятся в термически неравновесном и активном состоянии.

Площадь, ограниченная между кривыми и осью температуры, является количественной мерой оценки поглощенной (выделенной) теплоты. Сравнительная оценка термической активности продуктов износа выбранных фрикционных материалов по способности поглощения теплоты и значения поглощенного количества тепла представлены на рис.6.

Рис.6. Сравнительная оценка термической активности и значения поглощенной теплоты продуктов износа различных КФПМ

При аргументации полученных данных в зависимости от типа связующих и износостойкости исследуемых фрикционных материалов выявлялась, что между способностью поглощения теплоты, типа связующего и износостойкостью определенной корреляции нет. В частности, свойства продуктов износа материалов на основе комбинированного связующего и материалов на основе каучукового связующего по термической активности и способности поглощения теплоты почти одинаковые, тогда как они отличаются по свойствам износостойкости. Продукты износа материала каучукового связующего, который характеризуется наименьшей износостойкостью, обладают минимальной способностью поглощения теплоты.

Поэтому, 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 с поверхности трения, однако они экструдируются из зоны фрикционного контакта в результате растрескивания рабочего слоя под воздействием больших поверхностных напряжений, превышающих предел прочности материала при срезе. Следовательно, разработку новых композиционных фрикционных тормозных материалов рационально проводить двумя методами:

- регулированием протекающих механохимических и структурных изменений путем их смещения 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 новых фрикционных тормозных материалов.

В качестве более термостойких армирующих наполнителей были выбраны базальтовые и стеклянные волокна, полученные из минералов армянского месторождения. При разработке новых фрикционных безасбестовых полимерных материалов была поставлена задача: создать композиции на базе базальтового и стеклянного волокон со стабильными фрикционно-износными свойствами в широком диапазоне температур на поверхности трения. В результате целенаправленного выбора связующих, порошкообразных наполнителей и минералов армянского месторождения созданы новые фрикционные безасбестовые композиционные материалы под общим названием Бастенит. На основе трехэтапного рационального цикла экспериментального исследования установлено, что базальтовые и стеклянные волокна являются успешными заменителями асбестовых волокон, благодаря их сравнительно высокой прочности. Разработан механизм структурообразования новых экологически безвредных фрикционных безасбестовых композиционных материалов, согласно которому волокна обеспечивают высокую прочность композиции, работают как самостоятельные наполнители, не находясь в химической связи с полимерным связующим, одновременно повышают трибологические характеристики материала [8, 9]. Свойства и области применения материалов типа Бастенит представлены в табл. 1.

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 РФ226001 8 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	0,38-0,57	0,36-0,56	0,38-0,58	0,37-0,6
Износ, $\times 10^{-5}$ 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, °С	600	600	700	700	750	750	780	820	820
Максимальная объемная температура, °С	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	ПОДЪ- ЕМНО- ТРАНС- ПОРТ.Е МАШИН	Транс- портные средства, кузнечно- прессовое оборудов.	Автомобили, подъемно- транспортные машины и кузнечно- прессовое оборудование		Тракторы, автомобили, железнодорожный транспорт				

Материалы Бастенит позволяют стабилизировать фрикционно-износные характеристики пары трения при поверхностных температурах 500...600 $^{\circ}\text{C}$ устранить поверхностные дефекты контактирующих деталей и термические трещины металлического контртела, уменьшить износ фрикционной накладки и контртела в 1,8

и 1,6 раза соответственно в условиях наличия влаги во фрикционном контакте, стабилизировать и повысить коэффициент трения в 1,5 раза при 400...600 °С, защитить поверхность трения контртела от коррозионного и водородного износа.

Работа выполнена в рамках научной темы “Создание и исследование деталей машин и композиционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов” базовых проблемных лабораторий «Трибология» и «Материаловедение и металлургия» Национального Политехнического Университета Армении за 2014-2020гг. при финансовой поддержке ГКН МОН РА.

1. Погосян А.К., Сысоев П.В., Меликсетян Н.Г. и др. Фрикционные композиты на основе полимеров . – Минск. Информтрибо, 1992. - 218 с.
 2. Погосян А. К., Меликсетян Н. Г., Ламбарян Н. А. Высокотемпературное разрушение поверхностных слоев фрикционных материалов /Труды 7-го Международного Симпозиума по фрикционным изделиям и материалам «ЯРОФРИ-2008». - Ярославль, 2008. <http://www.tiir.ru/>
 3. Меликсетян Н.Г. Управление свойствами фрикционных тормозных материалов путем регулирования протекающих при трении механохимических превращений /Сборник труд.. межд.науч.-техн.конф. Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2007), Гомель-Белорусь, 2007.- с.57-58.
 4. Меликсетян Н.Г. Кинетика структурных и фазовых превращений поверхностных слоев тормозных фрикционных материалов при трении /Проблемы механики N4 (29) Тбилиси, 2007.- с. 28-32.
 5. Keer L.M., Bryant M.D., Haritos G.K. Subsurface Cracking and Delamination // Transactions of the ASME. AMD, 1980. -Vol. 39. – P. 79-95.
 6. Погосян А.К., Меликсетян Н.Г. Напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев тормозных фрикционных материалов /Сборник труд.. VII межд. Конф. „Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред”. Армения, Горис, 2011.- с. 352-357.
 7. Агбалиян С.Г., Меликсетян Н.Г. Меликсетян Г.Н. Фрикционный перенос при трении безасбестовых тормозных материалов /Сборник труд.. международной XXIV научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера XXI века”Севастополь 2017.- с.160-164
 8. Меликсетян Н.Г., Агбалиян С.Г. Меликсетян Г.Н. Разработка и трибологическое исследование безасбестовых тормозных композиционных материалов /Труды 1-ой Межд. Конф. ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ Проектирование, моделирование, испытание и изготовление, Ереван, АРМЕНИЯ 2018 г.- с. 38-44.
-