

for products coated with new conservation and gun oils are higher than those of similar oils used in the Armed Forces of the Russian Federation.

Key words: small arms and artillery weapons, military equipment, corrosion protection, conservation oils, gun oils.

УДК 539.62

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-241

Е.В. Лукашова, Н.А. Лукашов, Д.Я. Антипин, М.А. Измеров
Брянский государственный технический университет,
Брянск, Россия, leno4kachepikova@gmail.com

ВЫБОР КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЗУНОВ ТЕЛЕЖКИ И КУЗОВА ВАГОНА ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СОВМЕСТИМОСТИ ФРИКЦИОННЫХ ПАР

Аннотация

В работе рассмотрены методы оптимизации выбора и использования фрикционных материалов в узлах трения опорных поверхностей скользунов тележки и кузова вагона. В качестве основного выбран метод нейрокомпьютерного моделирования. На основании расчетов, полученных данным способом, а также сканирования в области минимального износа путем аппроксимации были получены прогнозируемые и контрольные значения концентрации основных компонентов состава фрикционного металлокерамического материала. Определены физико-механические и триботехнические характеристики предложенного состава металлокерамического материала.

Ключевые слова: фрикционный материал, узел трения, износ, металлокерамический материал, триботехнические характеристики

Введение

Основным критерием выбора материалов для изготовления фрикционных узлов является их совместимость, которая представляет собой способность обеспечить оптимальное состояние трибосистем в определенном диапазоне условий работы с необходимыми критериями.

Хорошую совместимость фрикционных пар определяют такие параметры как прирабатываемость, отсутствие схватывания, стабильность, высокое значение коэффициента трения и требуемая износостойкость.

Оптимальным состоянием для пары трения опорных поверхностей скользунов тележки и кузова вагона является обеспечение стабильного коэффициента трения при незначительном износе. В данном случае обеспечение стабильного коэффициента трения может быть обеспечена выбором эффективного сочетания материалов для рассматриваемой пары трения.

Учитывая особенности функциональности скользунов тележки можно выделить основные требования к материалам рассматриваемой пары трения [1, 2]:

– величина коэффициента трения для пары (фрикционный материал – сталь) должна лежать в пределах $0,12 \dots 0,25$;

– показатель стабильности α , равный отношению среднего интегрального значения коэффициента трения к максимальному за период силового воздействия,

не должен быть меньше 0,8;

- снижение или увеличение коэффициента трения β после перерыва в работе («отдыха») не должно отличаться более чем на 10 % от величины коэффициента трения для этой пары в приработанном состоянии;
- износ фрикционного материала должен быть минимальным;
- фрикционный материал должен иметь твердость не менее НВ 80 (800 МПа).

Методы и материалы

Для оптимизации выбора и использования фрикционных материалов в узлах трения были рассмотрены три возможных метода [3, 4].

1. Метод заключается в том, что для выбора оптимального материала используется функция цели в виде:

$\Phi = \begin{cases} \max I^i(\vartheta, p) \\ \alpha_{\text{ст}} \leq \frac{f_{\text{ср}}^i}{f_{\text{макс}}^i(\vartheta, p)} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$	
--	--

где I – интенсивность изнашивания, зависящая от температуры ϑ и давления p ; $\alpha_{\text{ст}}$ – показатель стабильности коэффициента трения, равный отношению среднего коэффициента трения $f_{\text{ср}}$ для i -го материала к максимальному при данном режиме испытания.

Решение происходит в два этапа: для каждого из испытываемых материалов сначала вычисляются показатели интенсивности изнашивания, при этом показатель стабильности коэффициента трения имеет значение, которое больше допустимого; далее выбирается окончательный материал с наименьшей интенсивностью изнашивания среди исследуемых пар трения.

Основным недостатком рассмотренного метода является отсутствие базы данных о трибологических характеристиках материалов и необходимость проведения соответствующих испытаний материалов пар трения. К тому же данный метод не подходит для разработки нового материала, отвечающего техническим требованиям к конкретному узлу трения.

2. Аналитический метод выбора материалов с требуемыми характеристиками.

При выборе материала для элемента пары трения важно создать матрицу количественных требований к самому материалу. Затем эту матрицу можно сравнить со свойствами фрикционных материалов, известными из литературных источников или полученными в результате испытаний. Если какой-либо материал удовлетворяет всем сформулированным требованиям, то процесс выбора завершается. Одним из преимуществ данного метода является возможность автоматизации расчетов с использованием современных компьютерных технологий.

В качестве основного недостатка можно выделить необходимость наличия базы данных о трибологических характеристиках исследуемых материалов, а также проведение предварительного экспертного анализа для определения значимости каждого из критериев оптимизации, как и в первом случае.

3. Метод заключается в применении нейрокомпьютерного моделирования при выборе материала.

В последнее время во многих приложениях находит все большее место новый инструмент для исследований, основанный на применении искусственных нейронных сетей.

Разработка нейросетевых моделей трения состоит из следующих этапов:

- локализация задачи;

- подготовка результатов экспериментальных исследований в виде таблиц данных;
- выбор архитектуры нейронной сети, исходя из требований задачи;
- обучение интегрированной нейронной сети (ИНС);
- исследование на нейронных моделях.

На первом этапе для решения поставленной задачи необходимо определить набор векторов типа «вход – известный выход». Причем входами являются данные о химическом составе материала, а выходами, его технические характеристики. Обучение нейронной сети происходит на основе результатов исследования характеристик при трении составов металлокерамических сплавов.

Основная задача, которая будет решаемая с помощью нейронной сети, это прогнозирование характеристик трения материалов в зависимости от их состава. Выбор оптимальных параметров узлов трения выполняется в программной системе методом сплошного перебора всех возможных комбинаций при линейной целевой функции. При этом необходимо ввести дискретизацию (количество точек разбиения соответствующего параметра) по всем управляющим параметрам и значимости по выходным параметрам. В связи с этим целевая функция имеет вид:

$$C = \sum_{i=1}^N z_i x_i, \quad (2)$$

где C – целевая функция; z – значимость оптимизируемого параметра; x – варьируемый параметр.

В результате исследования с применением нейронных сетей состоят из следующих этапов:

- 1) результаты эксперимента;
- 2) обучение нейронной сети на решение задачи;
- 3) проведение исследований на нейронных сетях;
- 4) получение новых экспериментальных данных;
- 5) дообучение нейронной сети, и т.д.

Таким образом формируется библиотека нейронных сетей, полученных с помощью проведенных исследований. Каждый компонент полученной библиотеки представляет собой нейронную сеть, способную решить конкретную задачу в трибологии. В качестве примера на рис. 1 представлена схема одного из вариантов нейросети с пятью входами и тремя выходами.

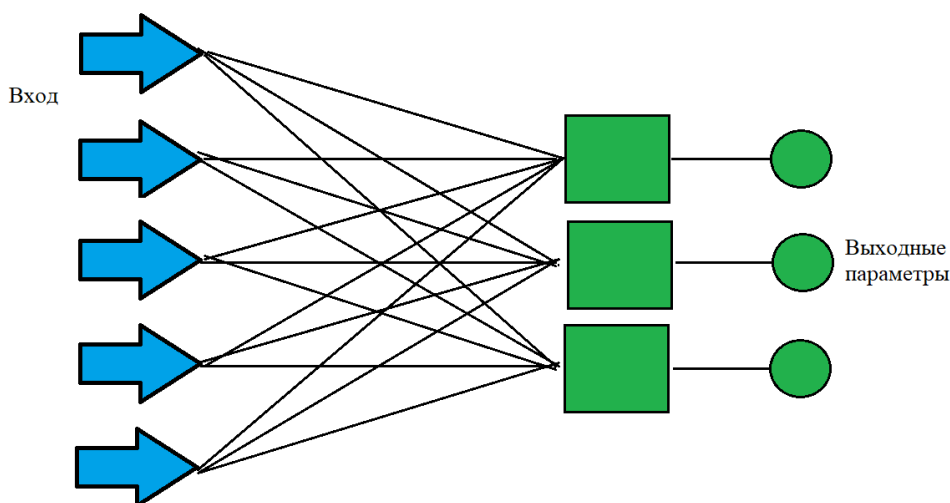


Рисунок 1 – Схема одного из вариантов нейронной сети

В виде основного метода, для дальнейшего исследования оптимизации

выбора и использования фрикционных материалов в узлах трения опорных поверхностей скользунов тележки и кузова вагона, был принят метод нейромоделирования. Данный метод дает возможность разработать новый материал, отвечающий техническим требованиям для рассматриваемого узла. В качестве инструмента исследования был использован нейросетевой программный пакет SPJ_neur1.0, разработанный в Брянском государственном техническом университете, ориентированный на решение трибологических задач.

Результаты и обсуждение

С помощью нейросетевой программы была осуществлена процедура поиска состава новых материалов (виртуальных материалов (ВМ)), за основу были взяты данные о уже имеющихся четырех металлокерамических композициях (табл. 1).

Таблица 1 – Данные для формирования нейросети

Условный номер	Химический состав, %							Выходные характеристики			
	Pb	Графит	SiO ₂	MoS ₂	Sn	BaSO ₄	Асбест	f_{cp}	α	β	И (ΔV) (мм ³ /кДж)
4	2	2	5	2	5	–	–	0,30	0,78	1,00	0,10
9	2	4	5	2	5	6	–	0,28	0,68	0,97	0,11
10	–	9	3	2	5	–	–	0,34	0,85	1,00	0,21
20	7	9	3	–	8	–	3	0,30	0,90	0,97	0,09
ВМ1	2	9	5	2	9	–	–	0,25	0,88	1,00	0,08
ВМ2	1	8	5	2	5	5	–	0,29	0,72	1,00	0,12
ВМ3	2	8	4	2	5	5	–	0,30	0,81	1,00	0,16

Нейромоделирование используется для создания сети, которая отражает связи между отдельными компонентами химического состава и результативными свойствами на основе информации об этих четырех материалах. Путем введения различного химического состава для каждого виртуального материала (ВМ) и использования сформированной нейронной сети получают выходные данные, которые затем подвергаются анализу. Когда достигается удовлетворительный результат, моделирование завершается. Влияние отдельных компонентов композитного материала на триботехнические характеристики представлены в табл. 1, из которой установлено, что наилучшими результатами среди исследованных обладает материал ВМ1.

Для определения оптимального состава металлокерамического материала необходимо проанализировать воздействие отдельных компонентов на триботехнические свойства, определить содержание каждого компонента в процентном соотношении и выбрать окончательный состав после проведения реальных испытаний. Для изучения влияния компонентов фрикционного материала был проведен множественный корреляционный анализ. Полученные данные, на основе расчета корреляционной матрицы при уровне значимости $\alpha = 0,05$, показывают, что в качестве основных компонентов, оказывающих влияние на изнашивание металлокерамического материала, выступают: свинец, графит, дисульфид молибдена и олово.

Для определения оптимального состава компонентов был проведен с помощью нейросетевого моделирования полный факторный эксперимент (ПФЭ) 2⁴. При планировании по схеме ПФЭ реализуются все возможные сочетания факторов.

Уравнение регрессии для определения оптимального состава в исследуемом интервале значений концентрации компонентов с учетом взаимодействия факторов

запишем в виде:

$$Y = 65,87 + 9X_1 - 1,125X_2 - 9,125X_3 - 34X_4 - 1,75X_1X_2 - 5X_1X_3 + 6,625X_1X_4 - 0,125X_2X_3 - 0,5X_2X_4 - 5,25X_3X_4 - 1,25X_1X_2X_3 - 0,625X_1X_2X_4 - 1,25X_2X_3X_4 + 0,625X_1X_2X_3X_4.$$

Сравнение результатов эксперимента и расчета уравнения регрессии представлены на рис. 2, из которого видно, что рассмотренное уравнение имеет адекватные значения.

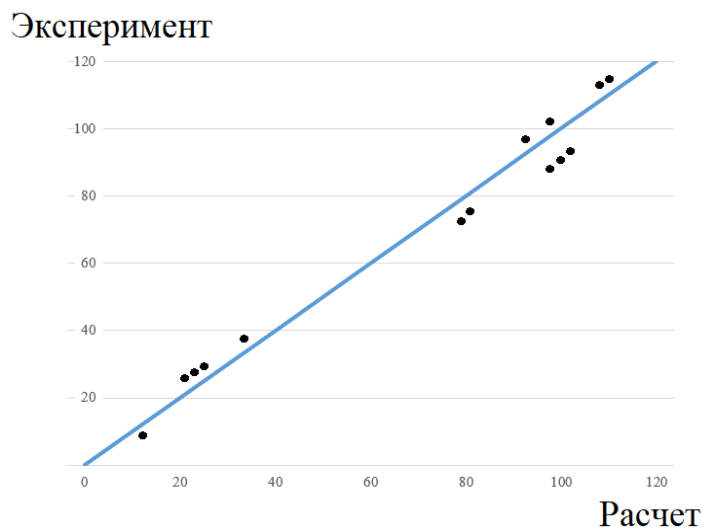


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных и расчетных (по уравнению регрессии) данных по износу

С помощью уравнения регрессии установлено, что по степени влияния компоненты металлокерамической композиции на износостойкость и эффекты их взаимодействия можно расположить следующим образом:

X_4 – концентрация олова. С увеличением концентрации олова износ снижается (коэффициент в уравнении регрессии равен -34);

X_3 – % масс. дисульфида молибдена. Коэффициент ($-9,125$) указывает на то, что с увеличением содержания дисульфида молибдена в композиционном материале износ уменьшается;

X_1 – концентрация свинца (коэффициент $+9$). Это означает, что с увеличением концентрации свинца износ растет;

$X_1 X_4$ – эффект взаимодействия свинца и олова ($+6,625$);

$X_3 X_4$ – эффект взаимодействия дисульфида молибдена и олова ($-5,25$);

$X_1 X_3$ – эффект взаимодействия свинца и дисульфида молибдена ($-5,0$).

Результаты анализа, полученные из нейрокомпьютерного моделирования и расчетов по уравнению регрессии, указывают на необходимость выбора оптимальных значений концентрации вблизи концентрационного вектора, соответствующего опытам, при которых сочетание компонентов приводит к локальному минимуму износа. Нейрокомпьютерное моделирование позволяет просканировать окрестность концентрационного вектора с использованием ранее созданной нейронной сети с целью поиска глобального минимума износа. Проведя вычислительный эксперимент, получаем данные об износе при заданных концентрациях выбранных компонентов (табл. 2).

Оптимальные $X_{\text{опт}}$ значения факторов каждого вектора определяли по результатам опытов с номерами N_1, N_2, N_3 (N_1 – серия опытов № 17...20, N_2 – № 21...24, N_3 – № 15).

Оптимальная концентрация каждого компонента определяется по формуле

[5]:

$$Z_0 = Z_3 + \frac{(f_1 - f_2)d}{2(f_1 + f_2 - 2f_3)}, \quad (5)$$

где f_1, f_2, f_3 – износ для опытов N1, N2, N3 соответственно; Z_1, Z_2, Z_3 – концентрации оптимизированного фактора (компонента) для опытов с номерами N1, N2, N3; d – значение шкалы желательности ($d \in [0,1]$).

Таблица 2 – Результаты вычислительного эксперимента

№ опыта	Концентрация				Износ $\Delta V, \text{мм}^3$
	Pb	Графит	MoS ₂	Sn	
17	0	2	0	5	94
18	0	5	2	5	20
19	0	9	2	5	47
20	0	3	2	5	16
21	0	4	2	10	26
22	0	8	0	10	103
23	0	6	2	10	39
24	0	9	0	10	104

Результаты расчетов сведем в табл. 3.

Таблица 3 – Значения факторов

Оптимизируемый фактор	N ₁	N ₃	N ₂	Z ₁	Z ₃	Z ₂	f ₁	f ₃	f ₂	d	Z ₀	Z _k
X ₁ (Pb)	17	15	21	0	0	0	94	6,9	26	1,0	0,32	-0,32
X ₂ (графит)	18	15	22	5	9	8	20	6,9	103	0,5	8,81	9,19
X ₃ (MoS ₂)	19	15	23	2	2	2	47	6,9	39	1,0	2,06	1,94
X ₄ (Sn)	20	15	24	5	10	10	16	6,9	104	1,0	9,59	10,41

Для проверки оптимальности Z_0 рассчитаем контрольные концентрации в целях проверки оптимального значения по формуле:

$$Z_k = 2Z_3 - Z_0. \quad (5)$$

Таким образом, сканирование в области минимального износа путем аппроксимации [7] позволило получить прогнозируемые и контрольные значения концентрации основных компонентов, входящих в состав фрикционного металлокерамического материала (олово – 10 % масс., графит – 9 % масс., дисульфид молибдена – 2 % масс.).

Для экспериментальной проверки свойств металлокерамического фрикционного сплава с оптимальным (на основе нейромоделирования) соотношением состава на железной основе были подготовлены девять смесей с ингредиентами на основе порошковых материалов. В результате в режиме трения во фрикционных узлах ингредиенты выполняют следующие функции.

Железо является основным связующим компонентом и обеспечивает общую прочность порошкового сплава.

Олово, благодаря низкой температуре плавления, образует в процессе теплоимпульсного трения рабочий слой, обеспечивающий положительный градиент механических свойств по глубине и предохраняющий поверхности трения от интенсивного изнашивания. Содержание олова в порошковой фрикционной смеси менее 9 % масс. приводит к снижению износостойкости при некотором увеличении коэффициента трения. Введение в состав сплава более 9 % масс. снижает величину

коэффициента трения.

Дисульфид молибдена служит в процессе трения твердым смазочным материалом, препятствующим молекулярному схватыванию поверхностей. Как показали испытания фрикционных спеченных материалов содержание в сплаве дисульфида молибдена менее 1,5 % масс. уменьшает износостойкость, а при его содержании более 3 % масс. не наблюдаются существенные изменения характеристик порошкового фрикционного сплава в процессе теплоимпульсного трения.

В результате эксперимента было установлено, что указанные свойства ингредиентов, вводимых в предлагаемый сплав в предлагаемом соотношении, обеспечивают повышение его износостойкости и надежную работу узла трения.

Для обеспечения коэффициента трения $f = 0,12...0,25$ пористый металлокерамический материал пропитывался маслом АМГ-10.

Заключение

На основе нейрокомпьютерного моделирования был подобран металлокерамический фрикционный сплав имеющих следующее соотношение олово – 10 % масс., графит – 9 % масс., дисульфид молибдена – 2 % масс. В результате эксперимента было установлено, что подобное соотношение является оптимальным и обеспечивают повышение износостойкости и надежную работу узла трения. Для обеспечения коэффициента трения $f = 0,12...0,25$ пористый металлокерамический материал пропитывался маслом АМГ-10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров В.П. Обоснование рациональной конструкции скользунов тележки пассажирского вагона / В.П. Тихомиров, М.Г. Шалыгин, Ф.Ю. Лозбинев, Д.Я. Антипин // Транспортное машиностроение. - 2023. - № 08. - С. 41-48. doi: 10.30987/2782-5957-2023-8-41-48.
2. Полюшкин, Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие / Н.Г. Полюшкин; Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2013. - 192 с.
3. Филиппов, М.А. Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие / М.А. Филиппов, О.Ю. Шешков; М-во науки и высш. образования РФ. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 204 с.
4. Основы теории трения и изнашивания: практикум / В.А. Зорин, Ю.В. Штефан. - М.: МАДИ, 2023. - 126 с.
5. Оптимизация химико-технологических процессов. Практикум / В.В. Бочкарев, А.А. Троян; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. - 160 с.
6. «Основы трибологии (трение, износ, смазка)» / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский и др./ под ред. А.В. Чичинадзе: учебн. для техн. вузов - М.: центр «Наука и техника», 1995. - 778 с.
7. Евельсон, Л.И. «Параметрическая оптимизация гидрогазового поглощающего аппарата ГА-500» / Л.И. Евельсон, Б.Г. Кеглин., Л.А. Монашкин // Динамика, нагруженность и надежность подвижного состава: межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1985. С. 29-36.
8. Evelson, L. «Optimization of Elastomer Bunder Shape Parameters» / L. Evelson, M. Rafalovskia // Internation SAE Congress, Detroit, Mechigan, 1998. - P. 1-5
9. Гаркунов Д.М. Триботехника: Уч. для вузов. - Г.: Машиностроение, 1989. - 328 с.
10. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. - К.: Техника, 1970. - 396 с.
11. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов. - М.: Металлургия,

1980. - 187 с.

12. Зиновьев, Е.В. Полимеры в узлах трения машин и приборов / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин. - М.: Машиностроение, 1988. - 167 с.

13. Федорченко, И.М. Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств / И.М. Федорченко, Д.Я. Ровинский. - Киев: Наукова думка, 1976. - 240 с.

14. Kobishanov, V.V. Passenger Car Safety Prediction / V.V. Kobishanov, V.P. Lozbinev, V.I. Sakalo, D.Ya. Antipin, S.G. Shorohov, A.M. Vysocky // World Applied Sciences Journal. - 2013. - P. 208-212.

15. Трение и износ в машинах: практикум для студентов технических специальностей / П. Н. Богданович [и др.]; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. - Гомель: БелГУТ, 2014. - 134 с.

E.V. Lukashova¹, N.A. Lukashov¹, D.Ya. Antipin¹, M.A. Izmerov¹

¹Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russia, leno4kachepikova@gmail.com

SELECTION OF COMPOSITE MATERIAL FOR SUPPORTING SURFACES OF BOLLEY SLIDERS AND CAR BODY TO ENSURE COMPATIBILITY OF FRICTION PAIRS

Abstract

The paper discusses methods for optimizing the selection and use of friction materials in the friction units of the bearing surfaces of the bogie slides and the car body. The method of neurocomputer modeling was chosen as the main one. Based on calculations obtained by this method, as well as scanning in the area of minimal wear by approximation, predicted and control values of the concentration of the main components of the composition of the friction cermet material were obtained. The physical, mechanical and tribological characteristics of the proposed composition of the metal-ceramic material have been determined.

Keywords: friction material, friction unit, wear, metal-ceramic material, tribological characteristics

УДК 621

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-242

О.О. Новикова, В.В. Новиков, А.Н. Болотов
Тверской государственный технический университет
Тверь, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННОЙ АЛМАЗОСодЕРЖАЩЕЙ МИНЕРАЛОКЕРАМИКИ

Аннотация

Теоретически и экспериментально исследованы триботехнические свойства композиционного материала, полученного из алюминиевой пудры и микродисперсного алмаза методом порошковой металлургии с последующей модификацией поверхности микроплазменным электролитическим окислением. Предложена модель контактного взаимодействия