

УДК 621.892:519.2

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНОГО КАРКАСА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

И. И. ЕМАЕВ, Н. К. КРИОНИ, В. И. СЕМЕНОВ, С. В. ЧЕРТОВСКИХ, Л. Ш. ШУСТЕР

okmim@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 24.06.2016

Аннотация. Выполнен регрессионный анализ влияния процентного содержания углеродного каркаса (УК) и цилиндрического масла в смазочном материале (СМ) на его триботехнические показатели, определяемые на четырехшариковой машине трения (ЧМТ). Установлен наиболее рациональный состав СМ, обеспечивающий предпочтительные триботехнические характеристики.

Ключевые слова: критическая нагрузка; нагрузка сваривания; индекс задира; диаметр пятна износа; факторный эксперимент; математические модели.

В работе [1] показано, что применение УК, получаемого из остаточного продукта переработки нефти, в качестве модификатора пластичной смазки обеспечивает триботехнические характеристики, более благоприятные, чем известные модификаторы: дисульфид молибдена, графит и др. Вместе с тем остается неизученным вопрос о влиянии процентного содержания УК на триботехнические характеристики СМ. Данная работа направлена на восполнение этого пробела.

Целью работы является экспериментальное изучение с помощью математико-статистического метода влияния процентного содержания УК и цилиндрического масла (ЦМ) на триботехнические характеристики: критическую нагрузку $P_{кр}$, нагрузку сваривания $P_{св}$, индекс задира Из, диаметр пятна износа Ди.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Использование математико-статистических методов при постановке задачи, эксперименте и при обработке полученных результатов существенно уменьшает сроки решения задач, снижает затраты на исследования и повышает качество полученных результатов [2].

Численное моделирование осуществляли с помощью планирования полного факторного эксперимента методом «крутого восхождения» [3]. При этом изучали зависимости критической нагрузки $P_{кр}$, нагрузки сваривания $P_{св}$, индекса задира Из и диаметра пятна износа Ди от про-

центного содержания в СМ УК и ЦМ. В качестве загустителя использовали литол, полагая, что его содержание в СМ не оказывает существенное влияние на триботехнические характеристики СМ.

В качестве независимых переменных были выбраны: процентное содержание УК (X_1) и процентное содержание ЦМ (X_2). В качестве зависимых переменных рассматривали $P_{кр}$, $P_{св}$, Из, Ди. Каждый из факторов варьировали на двух уровнях. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе указаны в табл. 1.

Таблица 1

Уровни факторов

Факторы	X_1 (УК)	X_2 (ЦМ)
Основной уровень (x_i)	12	70
Интервал варьирования (Δx_i)	8	10
Верхний уровень ($x_i = 1$)	20	80
Нижний уровень ($x_i = -1$)	4	60

Кодирование значения количественных факторов (x_i) связаны с натуральными (X_i) соотношениями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 12}{8}; x_2 = \frac{X_2 - 70}{10}. \quad (1)$$

Для получения возможно более полной информации об изучаемых зависимостях воспользуемся полным факторным экспериментом. Количество опытов N определяли по количеству независимых факторов в соответствии с выражением:

$$N = 2^k = 2^2 = 4. \quad (2)$$

Математическая модель после реализации опытов полного факторного эксперимента имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (3)$$

где b_i – коэффициент регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели сформировали расширенную матрицу планирования и результатов опытов (табл. 2).

Коэффициент регрессии рассчитывали по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (4)$$

где $i = 0, 1, 2, 3, 4$.

Таблица 2

**Расширенная матрица плана 2^2
и результатов опытов**

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+	+	+	+	
2	+	–	+	–	
3	+	+	–	–	
4	+	–	–	+	

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Порошок из УК получали путем измельчения в ступе и просеивания до размера 0,5 мкм. Смазочную композицию получали путем тщательного перемешивания компонентов: порошка из УК, литола и ЦМ. Процентное содержание компонентов определяли по весу, с помощью аналитических весов. Литола использовали в качестве загустителя.

Противоизносные и противозадирные свойства СМ определяли на ЧМТ по ГОСТ 9490-75. Данный стандарт распространяется на жидкие и пластичные СМ, применяемые для уменьшения силы трения между трущимися поверхностями. При этом определяются следующие основные

трибологические характеристики смазочных материалов:

- несущая способность – нагрузка сваривания ($P_{св}$);
- предельная нагрузочная способность – критическая нагрузка ($P_{кр}$);
- противозадирные свойства – индекс задир (ИЗ);
- противоизносные свойства – показатель износостойкости (диаметр пятна износа D_i).

Образцы – четыре шарика диаметром 10 мм – образуют пирамиду (рис. 1). Материал шариков – сталь ШХ15. Три нижних шарика неподвижны в чашке с испытываемым смазочным материалом, верхний шарик закреплен в шпинделе, вращающимся с частотой 1460 ± 70 об/мин. Чашка с нижними шариками устанавливается в горизонтальной плоскости относительно верхнего шарика. Смазочный материал при испытаниях полностью покрывает шарики.

Каждый эксперимент проводился на новой пробе испытываемого СМ и с четырьмя новыми шариками.

Продолжительность работы машины от момента включения до момента выключения при текущей нагрузке в процессе определения критической нагрузки, нагрузки сваривания и индекса задир составляет $10 \pm 0,2$ с., при определении показателя износа – $60 \pm 0,5$ мин.

Для определения диаметра пятна износа шариков используется микроскоп с увеличением $\times 20$, снабженный отсчетной шкалой с ценой деления 0,01 мм.

Характер изменения пятна износа нижних шариков от нагрузки позволяет определить критическую нагрузку $P_{кр}$. Она соответствует точке перегиба на кривой зависимости износа от нагрузки. По существу, при нагрузке, превышающей $P_{кр}$, начинается интенсивный износ, вызванный схватыванием в результате разрушения адсорбционного слоя смазки.

Нагрузкой сваривания ($P_{св}$) считают наименьшую нагрузку, при которой произошла автоматическая остановка машины при достижении момента трения 1180 ± 2 Н·см или сваривания шариков. Для смазочных материалов, у которых сваривание не наблюдается и момент трения ниже предельного, за нагрузку сваривания принимают нагрузку, при которой образуется пятно износа средним диаметром 3 мм и более.

Интенсивность износа нижних шариков от начала трения и до сваривания зависит от способности материала длительно удерживать

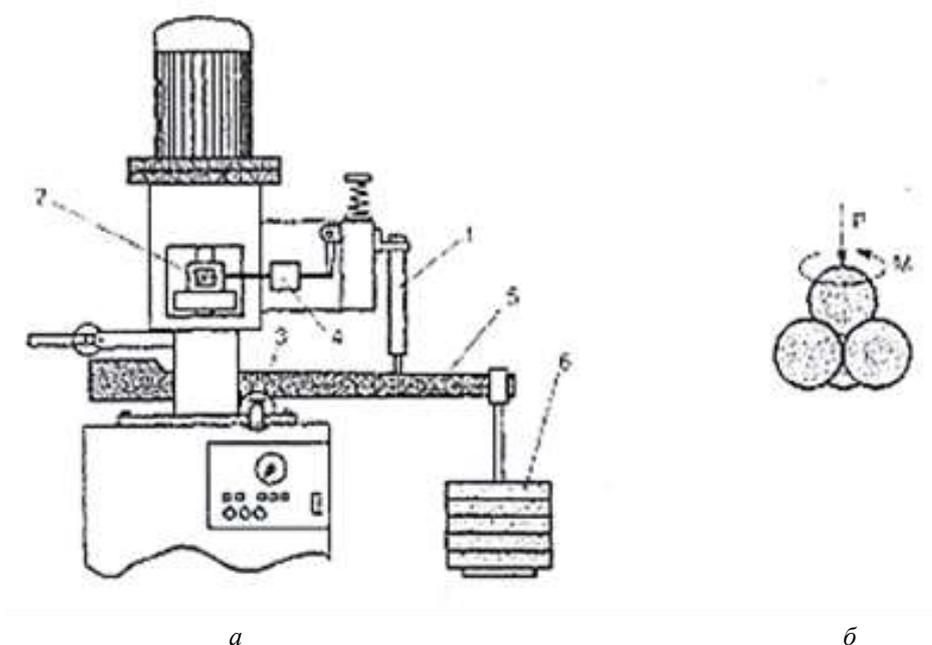


Рис. 1. Схема установки ЧМТ-1 (а) и схема трения (б):
1, 4 – датчики перемещения и силы; 2 – узел трения; 5 – рычаг; 6 – грузы

жидкостный режим трения и характеризуется индексом задира Из. При определении индекса задира Из испытание начинается с начальной нагрузки 196 Н. Последующие определения проводят с возрастающими нагрузками до нагрузки сваривания.

Индекс задира Из вычисляется по формуле:

$$\text{Из} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (5)$$

где $\sum Q_i$ – сумма условных нагрузок от начальной нагрузки до ближайшей нагрузки, предшествующей нагрузке сваривания; n – число определений.

Условную нагрузку Q_i для каждой осевой нагрузки P_i вычисляли по формуле:

$$Q_i = P_i \frac{d_i}{d_{ui}}, \quad (6)$$

где P_i – исследуемая величина нагрузки; d_i – средний диаметр пятна износа нижних шариков, соответствующий нагрузке P_i ; d_{ui} – диаметр пятна зоны упругой деформации шариков по Герцу, соответствующий нагрузке P_i .

Показатель износа Ди определяется при постоянной нагрузке, установленной в нормативно-технической документации на смазочный материал. В данной работе противоизносные свойства оценивали показателем износа Ди, ко-

торый определяли как среднее арифметическое значение диаметров пятен износа трех нижних шариков после использования в течение одного часа при нагрузке 0,4 кН. Величина критической нагрузки $P_{кр}$ в значительной мере связана с противоизносными свойствами, так как характеризует способность СМ изменять изнашивание трущихся поверхностей при изменении нагрузки.

Противозадирные свойства оценивали нагрузкой сваривания $P_{св}$ и индексом задира Из. Эти показатели характеризуют предельную работоспособность СМ. Все эксперименты повторяли по 2 раза и рассматривали среднеарифметические результаты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 3 приведены экспериментальные результаты, полученные на ЧМТ.

В результате произведенных вычислений получили следующие общие виды линейных уравнений регрессии:

– для $P_{кр}$:

$$y_1 = 1,07 - 0,04x_1 + 0,10x_2 - 0,13x_1x_2; \quad (7)$$

– для $P_{св}$:

$$y_2 = 3,60 + 1,02x_1 - 0,24x_2 - 0,16x_1x_2; \quad (8)$$

– для Из:

$$y_3 = 79,10 + 12,97x_1 + 0,59x_2 - 3,08x_1x_2; \quad (9)$$

Результаты проведенных экспериментов

Состав смазок	$P_{кр}$, кН	$P_{св}$, кН	Из	Ди, мм
20% УК; 80% ЦМ; 0% Л	1,0	4,22	89,57	0,60
4% УК; 80% ЦМ; 16% Л	1,33	2,5	69,79	0,62
20% УК; 60% ЦМ; 20% Л	1,06	5,0	94,55	0,64
4% УК; 60% ЦМ; 36% Л	0,89	2,66	62,47	0,64

– для Ди:

$$y_4 = 0,63 - 0,01x_1 - 0,02x_2 - 0,01x_1x_2. \quad (10)$$

Как показали расчеты по методике [2], в уравнениях (7) и (10) коэффициенты регрессии являются статистически незначимыми, т.е. на величины диаметра пятна износа и критическую нагрузку исследуемые факторы (в заданном интервале варьирования) не оказывают существенного влияния. В уравнениях (8) и (9) все коэффициенты регрессии являются статистически значимыми.

Адекватность математических моделей (8) и (7) проверяли с помощью F – критерия Фишера [3]. Установлено, что гипотеза об адекватности этих моделей при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Из уравнений (8) и (9) видно, что наиболее значимое влияние на нагрузку сваривания и индекс задира оказывает процентное содержание углеродного каркаса.

При этом процентное содержание в смазке цилиндрического масла оказывает на эти трибологические характеристики неоднозначное влияние: нагрузка сваривания с повышением содержания ЦМ уменьшается (8), а индекс задира при этом возрастает (9). Это можно объяснить тем, что индекс задира вычисляется с учетом величины диаметра пятна износа (6), которая, как установлено выше, практически не зависит от исследуемых факторов в рассмотренном интервале варьирования.

Можно предположить, что именно поэтому на индекс задира более существенное влияние оказывает совместное действие исследуемых факторов. Это видно из сопоставления коэффициентов при произведении x_1x_2 в уравнениях (8) и (9): 0,16 и 3,08. Причем, для индекса задира (9) этот коэффициент является значимым.

Известно [4], что нагрузка сваривания в значительной степени зависит от локальной прочности фрикционного контакта, т.е. от отношения τ_{nm} / p_m , где τ_{nm} – тангенциальная прочность адгезионных связей на срез при нормальных

напряжениях на контакте p_m , соответствующих пластической деформации на фрикционном контакте.

В условиях, когда отношения $\tau_{nm} / p_m \geq 0,5$, происходит сваривание фрикционного контакта с образованием задира [5].

При исследовании смазочных материалов на ЧШМ происходит естественный разогрев зон фрикционного контакта за счет диссипации потерь энергии на трение. Возможно, это приводит к термической деструкции углеродного каркаса, входящего в состав смазочных материалов, что формирует немонотонный характер зависимости отношения τ_{nm} / p_m от температуры контакта [1]. При этом процентное содержание углеродного каркаса в смазочном материале изменяет уровень величины этого отношения.

Следовательно, нагрузка сваривания является наиболее информативной характеристикой трибологических свойств смазочных материалов для оценки влияния различных модификаторов.

Из уравнения (8) следует, что в исследованном диапазоне изменяющихся параметров при значениях переменных $x_1 = 1$, а $x_2 = -1$ нагрузка сваривания достигает максимальной величины, т.е. в СМ должно быть: УК $X_1 = 20\%$, ЦМ $X_2 = 60\%$, литола 20%.

Как показали дополнительные исследования, с учетом стоимости компонентов, оптимальным является следующий состав СМ: 12% УК, 68% ЦМ, 20% литол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в исследованном диапазоне изменяющихся параметров наиболее значимое влияние на нагрузку сваривания и индекс задира оказывает процентное содержание УК. Диаметр пятна износа и критическая нагрузка практически не зависят от содержания в СМ изучаемых компонентов. Предложен процентный состав компонентов СМ, обеспечивающий наибольшую величину нагрузки сваривания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Емаев И. И., Зубер В. И., Криони Н. К., Нигматуллин Р. Г., Шустер Л. Ш.** Влияние модифицирования смазочных материалов углеродным каркасом на их трибологические характеристики // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 25-27. [I. I. Emaev, V. I. Zuber, N. K. Krioni, R. G. Nigmatullin, L. Sh. Shuster // The lubricants modifying effect by carbonic carcass on their tribological characteristics, (in Russian), in *Trenye i smazka v mashinah*, 2015, № 9, pp. 25-27]
2. **Захаров С. М.** Задачи компьютерной трибологии // Трение и износ. 2002. Том 23, № 3. С. 237-242. [S. M. Zaharov, Tasks computer tribology, (in Russian), in *Trenye i iznos*, Vol. 23(3), pp. 237-242]
3. **Славутский Л. А.** Основы регистрации данных и планирования эксперимента. Чебоксары: ЧГУ, 2006. 200 с. [L. A. Slavutski, Fundamentals of data acquisition and experimental design, (in Russian). Cheboksary: ChGU, 2006]
4. **Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Шолом В. Ю., Мигранов М. Ш.** Покрyтия и смазка в высокотемпературных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с. [L. Sh Shuster, N. K. Krioni, V. Yu. Sholom, M. Sh. Migranov, *Coatings and lubrication in hightemperature conjugation and metalworking*, (in Russian). M: Mechanical engineering, 2008]
5. **Шустер Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с. [L. Sh Shuster, *Adhesion bond solid metal bodies*, (in Russian). Ufa: Gilem, 1999]

ОБ АВТОРАХ

ЕМАЕВ Илья Игоревич, асп. каф. технологии машиностроения, дипл. инж. (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. трибологии.

КРИОНИ Николай Константинович, проф., ректор УГАТУ. Д-р техн. наук (РГУНИГ им. акад. И.М. Губкина, 2005). Иссл. в обл. трибологии, контактного взаимодействия твердых тел.

СЕМЕНОВ Владимир Иванович, вед. науч. сотр. НИИ ФПМ. Канд. техн. наук (г. Уфа, ИПСМ РАН, 1995). Иссл. в обл. наноструктурированных металлических материалов и трибологии.

ЧЕРТОВСКИХ Сергей Владимирович, доц. каф. основ конструирования механизмов и машин. Дипл. маг. (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук (г. Москва, ВНИИЖТ, 2008). Иссл. в обл. трибологии.

ШУСТЕР Лёва Шмульевич, проф. каф. основ конструирования механизмов и машин. Д-р техн. наук (г. Москва, МГУНИГ, 1990). Иссл. в обл. высокотемпературной трибологии.

METADATA

Title: The regression analysis of the carbonic carcasses effect on the lubricant tribological characteristics.

Authors: I. I. Emaev, N. K. Krioni, L. Sh. Shuster, V. I. Semenov

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: okmim@ugatu.ac.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 7-11, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The regression analysis of the carbonic carcasse (CC) and the cylindrical oil in the lubricant percentage effect on its tribological performance determined by the four-ball machine was conducted. The most rational structure of the lubricant which provides advantageous tribological characteristics was detected.

Key words: critical load; welding load; load wear index; the diameter of the wear scar; factorial experiment; mathematical models.

About authors:

ЕМАЕВ, Илья Игоревич, Postgraduate, Dept. of the Mechanical Engineering, Dipl. Engineer (USATU 2014). Research in the field of tribology.

КРИОНИ, Nikolai Konstantinovich, Prof., Rector USATU. Dr. of Techn. Sci. (RGUNIG them. Acad. Gubkin, 2005). Research in the field of tribology, contact interaction of solids.

СЕМЕНОВ, Vladimir Ivanovich, Leading Researcher NII FPM. Cand. of Techn. Sci. (Ufa, IPSM, 1995). Research in the field of nanostructured metallic materials and tribology.

ЧЕРТОВСКИХ, Sergey Vladimirovich, Docent, Dept. of the basics of designing mechanisms and machines. Dipl. Magistrate (USATU, 2002). Cand. of Techn. Sci. (Moscow, VNIIZhT, 2008). Research in the field of tribology.

ШУСТЕР, Leva Shmulevich, Prof., Dept. of the basics of designing mechanisms and machines. Dr. of Techn. Sci. (Moscow, MGUNIG, 1990). Research in the field of hightemperature tribology.