

УДК 621.9.015

В.П. Тихомиров, Н.Н. Новикова

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО РОБАСТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ФРИКЦИОННОГО СПЕЧЕННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

Представлена методика выбора оптимального состава фрикционного спеченного порошкового материала для предохранительных фрикционных устройств с использованием нейрокомпьютерного робастного проектирования, позволяющая сократить время поиска и снизить затраты на эксперимент. Приведен анализ вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: робастное проектирование, нейрокомпьютерное моделирование, ортогональная матрица, отношение сигнал/шум.

Выбор состава композиционного материала или проектирование материала с требуемыми свойствами представляет собой сложную задачу. Нахождение оптимального состава – это приближение к идеальному в рамках четко сформулированных ограничений изделия. Указанную задачу отнесем к задаче параметрической оптимизации, используя метод Тагучи – метод робастного проектирования. В этом случае нет необходимости получить наилучший результат. Важно, чтобы полученный результат был достаточно близким к наилучшему.

Под робастным проектированием понимается подход к проектированию изделия, который заключается в уменьшении разбросов выходных характеристик путем применения методов проектирования, снижающих чувствительность к источникам разбросов.

Выбор материала, состоящего из нескольких компонентов, или его проектирование сводится к определению оптимального состава, наилучшим образом отвечающего требуемым эксплуатационным показателям. В ряде случаев успешная практика применения определенного фрикционного материала позволяет найти подходящий материал для проектируемого фрикционного устройства. Если отсутствует необходимая информация о том, как будет вести себя тот или иной материал в новом узле трения, то возникает необходимость проектирования материала, разработки технологии его изготовления и проведения соответствующих трибологических испытаний. А.В. Чичинадзе и Э.Д. Браун назвали цикл создания и исследования фрикционных материалов рациональным [1]. Опыт применения спеченных порошковых металлокерамических композиций в разных фрикционных устройствах показал, что эффективным является тот состав, который содержит компоненты, выполняющие следующие функции. Твердые смазочные материалы (графит, дисульфид молибдена – MoS_2) повышают износостойкость, легкоплавкие элементы (олово, свинец) снижают вероятность схватывания и заедания, наполнители в виде абразивных частиц (оксид кремния – SiO_2 , нитрид бора, алмазный порошок) способствуют увеличению фрикционного сопротивления и повышению стабильности коэффициента трения. Основой композиций являются порошки меди или железа. Спекание порошков происходит в инертной среде при достаточно высокой температуре (около 1000°C). Различное процентное содержание компонентов приводит к значительному изменению трибологических свойств. В первую очередь это касается износостойкости фрикционного материала. При этом коэффициент трения и его стабильность изменяются незначительно.

Таким образом, определение оптимального состава фрикционного спеченного порошкового материала позволяет увеличить эффективность разных фрикционных устройств, например предохранительных муфт сцепления привода стрелочного перевода.

Робастное проектирование. Разработка соответствующей методики определения оптимального состава фрикционного материала с требуемыми трибологическими показателями позволяет существенно сократить длительность исследования по выбору надле-

жащего материала. Применение метода Тагучи (G. Taguchi) дает возможность приблизиться к оптимальным параметрам состава, обеспечивающим эффективную работу узла трения. Метод Тагучи является эффективным экспериментальным методом, который позволяет оптимизировать факторы – состав композиции. В качестве факторов были выбраны свинец (условное обозначение P1), графит (P2), олово (P3) и абразивы (P4). В матрице планирования указано процентное содержание элементов. Как показали многочисленные эксперименты для разных композиций, оптимальное содержание дисульфида молибдена составило около 2 мас. % [2]. Поэтому в число варьируемых факторов дисульфид молибдена не был включен. Нами рассматривались три уровня варьируемых факторов.

Планирование полного факторного эксперимента (ПФЭ 3^4) предусматривает проведение $3^4=81$ опыта. Метод Тагучи (робастное планирование эксперимента) позволяет сократить число опытов до 9 – $L_9(3^4)$. Ортогональная матрица приведена в табл. 1.

Таблица 1

Ортогональная матрица L_9

Номер опыта	Факторы и их уровни			
	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Ортогональная матрица представляет собой числовую матрицу, столбцы которой попарно ортогональны. Это означает, что в каждой паре столбцов все упорядоченные пары чисел встречаются одинаковое число раз [3]. Уровни процентного содержания компонентов определялись на основе имеющихся примеров ранее проведенных физических экспериментов [4; 5]. Машинные эксперименты проводились на основе сформированной нейрокомпьютерной сети.

Для формирования нейросети были взяты примеры, приведённые в табл. 2.

Таблица 2

Примеры для формирования нейросети

Композиционный материал	Состав (мас. %) и условное обозначение			
	Pb (P1)	Графит (P2)	Sn (P3)	Абразив (P4)
К-1	2	4	5	5
К-5	5	4	0	5
К-7	2	4	0	5
К-11	0	9	5	3
К-13	2	4	5	8
К-14	0	9	5	6

Сформулируем задачу: требуется найти такой состав, чтобы его износостойкость оказалась наилучшей.

В соответствии с табл. 2 уровни факторов приняты следующими:

1-й уровень: P1=0; P2=4; P3=0; P4=3;

2-й уровень: P1=2; P2=6; P3=2; P4=5;

3-й уровень: P1=5; P2=9; P3=5; P4=8.

В табл. 3 приведена рабочая матрица с принятыми уровнями факторов и вычисленными с помощью нейрокомпьютерного моделирования значениями износостойкости. В табл. 3 приведены также вычисленные значения отношения С/Ш (сигнал/шум).

Выходная характеристика С/Ш, учитывающая свойство «больше – лучше» («larger is better»), определяется по формуле [6]

$$z(\theta) = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right).$$

Здесь y_i – выходной параметр ($y = И$ – износостойкость), полученный в результате i -го опыта.

Таблица 3

Рабочая матрица

Номер опыта	Pb (P1)	Графит (P2)	Sn (P3)	Абразив (P4)	Износостойкость (И, кДж/мм ³)	Отношение С/Ш
1	0	4	0	3	2,22	6,927
2	0	6	2	5	2,40	7,604
3	0	9	5	8	2,53	8,062
4	2	4	2	8	0,87	-1,210
5	2	6	5	3	2,60	8,299
6	2	9	0	5	1,54	3,750
7	5	4	5	5	2,23	6,966
8	5	6	0	8	0,77	-2,27
9	5	9	2	3	2,37	7,495

Анализ данных вычислительного эксперимента. На основании данных табл. 3 найдем средние значения отношения С/Ш для каждого фактора и уровня. Например, для фактора P1 и первого уровня

$$\langle C/Ш \rangle = \frac{6,927 + 7,604 + 8,062}{3} = 7,531,$$

для фактора P3 и второго уровня

$$\langle C/Ш \rangle = \frac{7,604 - 1,210 + 7,495}{3} = 4,630.$$

Зависимости для среднего значения отношения представлены на рис. 1, 2.

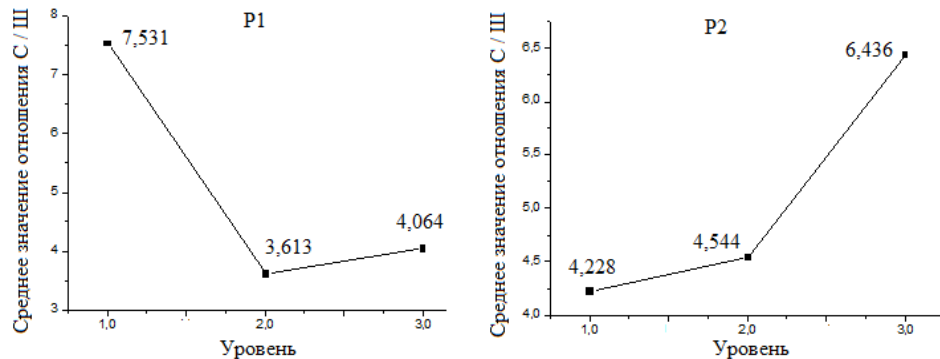


Рис. 1. Зависимость среднего значения отношения С / Ш (сигнал/шум) от уровня факторов P1 (содержание свинца) и P2 (содержание графита)

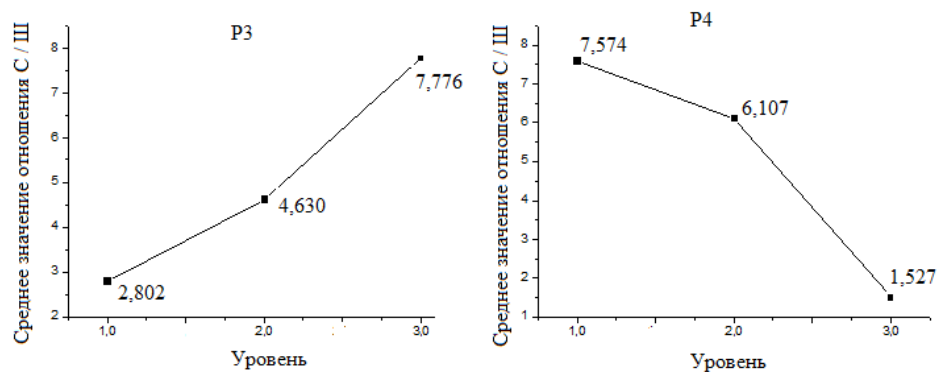


Рис. 2. Зависимость среднего значения отношения С / Ш (сигнал/шум) от уровня факторов P3 (содержание олова) и P4 (содержание абразивного порошка)

По максимальному значению отношения С/Ш для разных факторов находим оптимальный состав металлокерамической композиции: для Р1 (наличие свинца) максимальное среднее значение составило 7,531, что соответствует первому уровню, т.е. отсутствию в композиции свинца; для Р2 значение соответствует третьему уровню (содержание графита - 9 мас. %); для Р3 – содержанию олова 5 мас. %; содержание абразивного порошка(фактор Р4) – 3 мас. %.

Выводы:

1. Робастное планирование машинного эксперимента позволило найти оптимальный состав фрикционного спеченного порошкового материала, обеспечивающий высокое сопротивление износу при работе предохранительной муфты.

2. Рекомендуемый состав фрикционного спеченного материала оказался следующим: графит – 9 мас. %; олово – 5 мас. %; дисульфид молибдена – 2 мас. %; абразивный порошок (оксид кремния и алмазный порошок) – 3 мас. %; остальное – железо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для вузов/А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 644 с.
2. Тихомиров, В.П. Разработка новых металлокерамических материалов для фрикционных пар и исследование их поведения в амортизаторах удара/В.П. Тихомиров, Г.Ф. Шитикова//Физика и химия обработки материалов.- 1990. - №1.- С.108-114.
3. Леон, Р. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагучи: [пер. с англ.]/Р. Леон, А. Шумейкер, Р. Какар [и др.]. – М.: Сейфи, 2002. – 384 с.
4. Тихомиров, В.П. Нейросетевые модели в трибологии/В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов//Трение и износ.- 2000. – Т.21.- №3. – С. 246-251.
5. Тихомиров, В.П. Принципы выбора композиционных материалов для фрикционных узлов трения/В.П.Тихомиров, А.Г. Стриженок, А.В.Кондратович// Вестн. Брян. гос. техн. ун-та.- 2013. - № 1. – С. 49-56.
6. Krishankant, J.T. Application of Taguchi Method for Optimizing Turning Process by the effects of Machining Parameters/ J.T. Krishankant, Mohit Bector, Rajesh Kumar//International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).- 2012. –Vol. 2.- Is.1. –P. 263-274.

Материал поступил в редколлегию 16.05.14.