

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА

Кассов В.Д., канд. техн. наук, доц.;

Чигарев В.В., докт. техн. наук, проф.; Литвинов А.П., аспирант,
Донбасская государственная машиностроительная академия,
Приазовский государственный технический университет

Методами планирования многофакторного эксперимента и оптимизации математических моделей определен состав наплавленного металла для восстановления и упрочнения корпусов насосов с сочетанием оптимальных износостойкости и технологичности.

The methods of planning multifactor experiment and optimization of mathematical models determine structure of overlaid metal for restoration and hardening of cases pump with a combination optimum wear-resistance and adaptability to manufacture.

Цель настоящей работы - оптимизация состава наплавляемого металла для восстановления и упрочнения корпуса багерного насоса (углесоса), работающего в условиях гидроабразивного износа. Эта задача делится на две подзадачи: регрессионная идентификация модели исследуемой композиции металла и многокритериальная оптимизация модели с целью поиска состава с комплексом заданных физико-механических свойств.

Для снижения износа сплава необходимо обеспечить высокую твердость наплавляемого металла, сохранив при этом достаточный уровень пластичности. Поэтому с целью разработки рационального комплексного легирования наплавочного материала с оптимальной износостойкостью и технологичностью (склонностью к образованию холодных и горячих трещин) исследовали сплавы системы Fe-C-Cr, легированные Mn, Si, V Mo, W и Ti.

Анализ литературных данных и изучение износостойкости ряда сплавов в производственных условиях при восстановлении изношенных участков поверхности насоса, а также условие экономного легирования позволили ограничить область варьирования элементов следующими пределами (%): C 1-3, Mn 1-4, Si 0,5-2,5, Cr 8-12, V 0-2, Mo 0-2, W 0-4. Содержание титана оставалось постоянным 0,7-0,9%.

Для изучения характера влияния легирующих элементов на свойства железоуглеродистых сплавов в условиях гидроабразивного износа при незначительных ударных нагрузках и разработки рационального состава сплава в работе использовали следующие показатели: коэффициент относительной износостойкости сплава при различных углах атаки гидроабразивной смеси и склонность его к образованию трещин.

Относительную износостойкость сплавов оценивали в лабораторных и промышленных условиях. Лабораторные испытания на гидроабразивное изнашивание проводили на установке ПВ-12. В качестве абразива использовали молотый шлак с размером зерен 0,5-5 мм. Износ образцов определяли по потере массы за время испытания 25 мин. Износ образца одного химического состава определяли как среднее арифметическое из трех измерений, после чего производили замену абразивного материала. Коэффициент относительной износостойкости определяли как отношение потери массы эталонного образца (сталь 35Л) к потере массы образца исследуемого материала.

Для количественной оценки склонности наплавочных сплавов к образованию горячих трещин была использована следующая методика. Семь брусков из стали 35Л размером 100x15x15 мм собирали в зажимном приспособлении. Поперек собранных брусков наплавляли валик исследуемого сплава порошковой проволокой. После полного остывания образцы разрушали и определяли суммарную площадь излома, занятую горячими трещинами. Отношение этой площади к суммарной площади сечений валика (в %) служило мерой склонности наплавленного металла к горячим трещинам.

Для выявления холодных и горячих трещин, образующихся при наплавке, исследуемый сплав наплавляли в виде одиночного валика длиной 200 мм на пластину из стали 35Л размером 250x60x15 мм. Через сутки наплавленный валик разрезали вдоль оси вулканитовыми кругами с охлаждением зоны резки. Поверхность реза шлифовали и травили 15%-ным водным раствором персульфата аммония. Время травления составляло 10-15 мин. Определяли количество трещин на длине наплавленного слоя.

В качестве параметров оптимизации были выбраны коэффициенты относительной износостойкости при углах атаки гидроабразивной смеси 20, 45 и 80° (соответственно y_1 , y_2 , y_3), количество поперечных трещин на длине наплавленного слоя 200 мм (y_4), доля излома в %, занятая горячими трещинами (y_5).

Зависимость параметров оптимизации от состава сплава искали в виде полинома второго порядка вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^7 b_i x_i + \sum_{i=1}^7 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_7 – процентное содержание в сплаве соответственно С, Mn, Si, Cr, V, Mo, W.

Для получения математической модели вида (1) наиболее часто используют симметричные композиционные (ортогональные, ротатбельные, D-оптимальные) или не композиционные планы [1]. Однако эти планы при их реализации требуют большого числа опытов (для семи факторов более 60).

Отказ от симметричности позволяет строить планы в некоторых отношениях более эффективные. Одним из критериев оптимальности планов является число опытов в них. Поэтому при числе факторов в модели более пяти рационально использовать полностью насыщенные планы, число опытов в которых в точности равно числу членов квадратичной модели.

Для решения задачи регрессионной идентификации модели (1) исследуемой композиции сплава реализовали почти D-оптимальный насыщенный план Рехтшафнера для семи факторов, который содержит 36 опытов [1]. Столько же коэффициентов содержит модель (1). После обработки экспериментальных данных по методике работы [1] были получены нелинейные математические модели вида (1), позволяющие оценить эксплуатационные свойства сплавов в заданных пределах изменения содержания легирующих элементов С, Mn, Si, Cr, V, Mo, W в сплавах.

В связи с тем, что изменение параметров оптимизации в исследованных пределах нелинейное, для определения оптимального состава сплава необходимо воспользоваться методами нелинейного программирования.

Поскольку износ корпуса насоса происходит в результате действия гидроабразивной смеси с различными углами атаки частиц, при оптимизации состава сплава стремились получить наибольшие значения параметров износостойкости y_1, y_2, y_3 . При одинаковых значениях этих параметров предпочтение необходимо отдать составам с меньшими значениями величине y_4 и y_5 .

На первом этапе решали задачу однокритериальной оптимизации, т.е. оптимизировали один параметр y_j при заданных ограничениях на концентрацию легирующих элементов:

$$1 \leq C \leq 3; 1 \leq Mn \leq 4; 0,5 \leq Si \leq 2,5; 8 \leq Cr \leq 12; 0 \leq V \leq 2; 0 \leq Mo \leq 2; 0 \leq W \leq 4.$$

Эту задачу решали методом прямого поиска [2], как задачу безусловной оптимизации функции многих переменных с учетом прямых ограничений. Оптимальные составы сплавов, выбранные таким способом, приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, оптимальные составы сплавов, полученные в результате однокритериальной оптимизации по какому-либо параметру y_j , не совпадают.

Таблица 1 – Составы сплавов, полученные в результате однокритериальной оптимизации

Оптимизируемый параметр	Оптимальный состав сплава, %							Значение параметра оптимизации				
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	W	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
y_1	2,11	2,02	1,56	11,22	1,20	2,0	4,0	18,9	16,8	18,9	4,3	15,9
y_2	2,12	2,32	1,56	12,0	1,85	2,0	4,0	18,8	17,4	19,2	1,3	11,5
y_3	2,11	2,34	1,39	11,0	2,0	1,98	3,54	17,1	16,5	19,5	1,5	15,0
y_4	2,24	2,76	2,01	9,94	2,0	1,79	3,13	15,4	15,1	17,1	1,0	14,9
y_5	1,79	2,45	1,43	8,96	0	0	0,82	7,6	8,9	10,1	1,2	0,86

Поэтому на втором этапе решали задачу оптимизации как многомерную нелинейную задачу математического программирования, которая формируется следующим образом: определить оптимальное содержание легирующих элементов C, Mn, Si, Cr, V, Mo, W в сплаве, максимизирующее среднее значение относительной износостойкости

$$f = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \tag{2}$$

при возможно меньших значениях параметров y_4 и y_5 и заданных ограничениях на концентрацию легирующих элементов в сплаве.

Для обеспечения эксплуатационной надежности сплава в условиях гидроабразивного изнашивания были наложены такие ограничения:

$$y_4 \leq 3, y_5 \leq 15. \tag{3}$$

Полученную задачу математического программирования решали методом штрафных функций. Методы штрафных функций преобразуют задачу с ограничениями в последовательность задач безусловной минимизации некоторых вспомогательных функций [2]. Последние получают путем модификации заданной целевой функции с помощью функций - ограничений таким образом, чтобы ограничения

в явном виде задачи оптимизации не фигурировали. Это обеспечивает возможность применения методов безусловной минимизации.

В качестве минимизируемой функции была выбрана обобщенная функция вида:

$$F = -\frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} + \frac{1}{\tau} [\min^2(3 - y_4, 0) + \min^2(15 - y_5, 0)] + \tau \sum_{i=1}^7 \frac{1}{x_i - x_{in}} + \tau \sum_{i=1}^7 \frac{1}{x_{iv} - x_i}, \quad (4)$$

где x_{in} , x_{iv} – нижняя и верхняя граница содержания в сплаве i -го легирующего элемента; τ – коэффициент штрафа.

Последовательность задач безусловной минимизации функции F при монотонно уменьшающихся значениях коэффициента штрафа τ решали методом прямого поиска.

Поскольку оптимизируемая функция (1) не является выпуклой, в результате оптимизации было выбрано несколько составов сплавов (табл. 2, 3). В результате их производственных испытаний остановились на сплаве 210X12B4M2Г2СФТ (сплав под номером 3), обладающем наибольшей износостойкостью в условиях эксплуатации.

Таблица 2– Химический состав оптимальных сплавов

Номер сплава	Химический состав сплава, %							
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	W	Ti
1	<u>2,11</u>	<u>2,19</u>	<u>1,58</u>	<u>10,2</u>	<u>1,92</u>	<u>2,0</u>	<u>4,0</u>	<u>0,8</u>
	2,24	2,10	1,65	10,5	1,84	1,93	4,12	0,85
2	<u>2,11</u>	<u>2,28</u>	<u>1,75</u>	<u>10,2</u>	<u>1,84</u>	<u>2,0</u>	<u>3,87</u>	<u>0,8</u>
	2,18	2,36	1,83	9,8	1,76	2,10	3,70	0,76
3	<u>2,13</u>	<u>2,23</u>	<u>1,54</u>	<u>12,0</u>	<u>1,61</u>	<u>2,0</u>	<u>4,0</u>	<u>0,8</u>
	2,08	2,36	1,42	11,6	1,82	2,08	4,15	0,88
4	<u>2,09</u>	<u>2,31</u>	<u>1,55</u>	<u>10,9</u>	<u>1,52</u>	<u>2,0</u>	<u>3,70</u>	<u>0,8</u>
	2,21	2,20	1,36	11,5	1,45	1,94	3,62	0,75

Примечание. В числителе – расчетное значение, в знаменателе – экспериментальное

Установлено, что микроструктура сплава по всему сечению наплавки состоит из аустенита, ледебуритной эвтектики и мелких карбидов. У зоны сплавления со стороны наплавки микротвердость аустенита составляет 5810-6720 МПа, эвтектики 8562-12516 МПа. В верхней части наплавки микротвердость аустенита равна 6162-6954

МПа, эвтектики – 7258-8360 МПа. Твердость наплавленного металла НРС 53-56. Карбиды распределены равномерно по всей толщине наплавленного металла, начиная от зоны сплавления, что обеспечивает практически одинаковую по глубине износостойкость сплава.

Таблица 3– Характеристики оптимальных составов сплавов

Номер сплава	Параметры оптимизации					Время работы корпуса, ч
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	<u>17,4</u>	<u>16,6</u>	<u>19,0</u>	<u>1,0</u>	<u>15,0</u>	950
	16,6	15,8	18,3	2	12,6	
2	<u>17,3</u>	<u>16,5</u>	<u>18,6</u>	<u>1,0</u>	<u>15,0</u>	830
	18,4	17,7	17,5	3	14,2	
3	<u>19,3</u>	<u>17,4</u>	<u>20,2</u>	<u>1,1</u>	<u>12,7</u>	1210
	18,4	18,2	19,4	2	10,4	
4	<u>18,2</u>	<u>16,6</u>	<u>18,7</u>	<u>2,6</u>	<u>15,0</u>	890
	19,3	15,4	17,8	4	16,3	

Примечание. В числителе – расчетное значение, в знаменателе – экспериментальное

Производственные испытания сплава 210X12B4M2Г2СФТ подтвердили его высокую износостойкость (время работы корпуса углесоса до разгерметизации составило 1210 ч вместо 250 ч для литого корпуса из стали 35Л).

Таким образом, используя в качестве параметров оптимизации износостойкость при различных углах атаки гидроабразивной смеси и склонность к образованию трещин, методом планирования многофакторного эксперимента разработан состав наплаваемого металла 210X12B4M2Г2СФТ для восстановления и упрочнения корпуса углесоса. Применение разработанного сплава позволило повысить износостойкость литого корпуса углесоса в 4,5-4,8 раза и в 2-2,5 раза по сравнению с наплавленными известными материалами.

Список источников.

- 1 Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.-304 с.
- 2 Применение математических методов и ЭВМ. Вычислительные методы проектирования оптимальных конструкций / А.Н. Останин, В.А. Гугля, Н.Н. Гурский и др. – Минск: Вышейш. шк., 1989.-279 с.