

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ НАСЫЩАЮЩЕЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БОРА И ХРОМА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

М. А. Гурьев, Е. А. Кошелева, С. Г. Иванов

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Современные машиностроительные и металлургические предприятия широко используют различные виды инструментов. Стоимость их достаточно высока из-за сложности технологических процессов применяемых при их изготовлении и большого содержания в инструментальных сталях дорогостоящих легирующих элементов.

В настоящее время не менее 70–75 % выплавляемой инструментальной стали идет в различные отходы, и только 25–30 % эффективно используется в виде инструмента. В связи с этим, приобретает значимость использование инструмента с повышенным коэффициентом использования металла, меньшей стоимостью, повышенной стойкостью и меньшей трудоемкостью при изготовлении.

Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает применение литейных технологий в производстве инструмента. Изготовление инструмента различными методами литья приводит к сокращению расхода дорогостоящей инструментальной стали, снижению денежных затрат на изготовление инструмента и повышению его стойкости. При использовании литейных технологий появляется возможность в широких пределах использовать дополнительное легирование, микролегирование и модифицирование стали для повышения работоспособности инструмента исходя из конкретных условий его эксплуатации.

Одним из основных и наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая обработка (ХТО). Ее применение особенно эффективно, когда необходимо получить детали с заранее заданными свойствами: коррозионно- и износостойкостью, жаропрочностью и т. д. Основные недостатки традиционных способов ХТО (энергоёмкость и продолжительность по времени) во многом устраняются при совмещении этого процесса с изготовле-

нием отливок. Образование упрочненного слоя происходит в результате взаимодействия жидкого металла отливки с легирующим облицовочным слоем, предварительно нанесенным на поверхность литейной формы или модели.

Тем не менее использование поверхностного легирования отливок не находит широкого применения из-за отсутствия оптимальных составов насыщающего облицовочного слоя, а также из-за недостаточного понимания и неоднозначности трактовок происходящих процессов в металлах и сплавах при поверхностном легировании.

Целью работы явилось изучение закономерностей структурообразования в железоуглеродистых сплавах, полученных литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ) с нанесенной на их поверхность насыщающей обмазки для повышения износостойкости деталей машин и инструмента.

После подбора технологических параметров, изучения влияния углерода и легирующих элементов, входящих в состав стали, а также влияния различных компонентов, входящих в химический состав обмазки для насыщения на физико-механические свойства поверхности после проведенного насыщения, был произведен окончательный подбор компонентов насыщающей смеси для поверхностного легирования сталей.

В основу состава насыщающей смеси для поверхностного упрочнения стальных деталей и инструмента был принят карбид бора (B_4C) как поставщик бора. Следующим компонентом, входящим в состав обмазки, взят диборид хрома (CrB_2), являющийся поставщиком хрома. Для активизирования процесса насыщения из обмазки используется фторид натрия (NaF). Мелкодисперсный графит обеспечивает достаточную толщину диффузионных слоев и легкое отделение обмазки

после процесса насыщения. Bentonит обеспечивает необходимую жесткость обмазке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обмазки в процессе сушки.

Для уменьшения области исследований по поиску оптимальных значений содержания каждого компонента насыщающей смеси для поверхностного упрочнения экспериментально были установлены следующие ограничения для каждого компонента B_4C – 40–80 %, CrB_2 – 10–30 %, графит – 5–20 %, NaF – 5–15 %, бентонит – 2–5 %.

Для окончательной разработки состава обмазки для поверхностного легирования необходимо определить оптимальное соотношение компонентов. Для этого были использованы методы математической статистики.

В качестве исходных компонентов насыщающей смеси (обмазки) для поверхностного легирования использовались карбид бора (B_4C), диборид хрома (CrB_2), мелкодисперсный графит, фторид натрия (NaF) и бентонит. В отдельных экспериментах выбирались различные сочетания этих компонентов обмазки в процентном соотношении от общей массы.

В качестве испытуемых деталей были использованы ролики из стали 45Л. Данные ролики необходимы для подачи проволоки на станок для ее рубки. Изготовление образцов проводилось по указанной выше методике. Износостойкость роликов определялась ресурсом по количеству поданной проволоки (τ). Режим работы подающего ролика: подача проволоки $\varnothing 4$ мм на станок для ее рубки.

Для аналитического описания зависимости состав – свойство в многокомпонентных системах более удобен метод симплексных решеток, позволяющий получать математическую модель исследуемой зависимости, не требуя большого объема экспериментов. Данный метод был применен при изучении влияния химического состава многокомпонентной насыщающей среды на толщину и износостойкость борохромированных покрытий сталей, полученных методом поверхностного легирования.

Поскольку задача создания насыщающих смесей подобного рода является многофакторной, в ее основу должна быть положена определенная система. Предыдущие исследования показали, что в данном случае зависимость свойств борохромированных слоев от состава насыщающей обмазки необходимо изучать не во всей области изме-

нения концентрации компонентов, а лишь локальный участок, ограниченный следующим содержанием веществ в смеси при поверхностном легировании: B_4C – 40–80 %, CrB_2 – 10–30 %, графит – 5–20 %, бентонит – 5–15 %, NaF – 2–5 %.

Так как изучаемая локальная область представляет собой неправильный симплекс, то для получения уравнения регрессии был составлен симплекс-решетчатый план {5, 2} относительно псевдокомпонент Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 .

Матрица планирования второго порядка для пятикомпонентной смеси в псевдокомпонентах и исходных компонентах, а также результаты опытов (каждый опыт был повторен два раза) приведены в таблице 1.

Используя свойство композиционности симплекс-решетчатых планов, матрица планирования была достроена с учетом возможности при неадекватности уравнения регрессии построить полином третьего порядка.

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	Состав смеси										Обозначения и результаты измерений		
	Псевдокомпоненты					Исходные компоненты							
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	y	y^I	y^T
1	1	0	0	0	0	45	25	17	3	10	y_1	2,8	0,015
2	0	1	0	0	0	50	25	15	3	7	y_2	54,0	2,500
3	0	0	1	0	0	56	25	10	2	7	y_3	67,0	3,300
4	0	0	0	1	0	60	25	5	3	7	y_4	12,0	2,000
5	0	0	0	0	1	60	20	12	3	5	y_5	86,0	2,700
6	1/2	1/2	0	0	0	65	15	12	2	6	y_{12}	3,3	6,500
7	1/2	0	1/2	0	0	55	23	13	2	7	y_{13}	70,0	2,550
8	1/2	0	0	1/2	0	57	24	10	3	6	y_{14}	72,0	2,500
9	1/2	0	0	0	1/2	59	20	12	4	5	y_{15}	2,0	0,022
10	0	1/2	1/2	0	0	45	25	15	5	10	y_{23}	15,0	2,000
11	0	1/2	0	1/2	0	55	25	12	1	7	y_{24}	2,8	0,016
12	0	1/2	0	0	1/2	50	28	14	3	5	y_{25}	3,2	0,040
13	0	0	1/2	1/2	0	65	12	16	2	5	y_{34}	3,9	0,065
14	0	0	1/2	0	1/2	60	15	15	3	7	y_{35}	57,0	2,500
15	0	0	0	1/2	1/2	59	20	7	4	10	y_{45}	3,1	0,030
16	1/3	2/3	0	0	0	62	28	5	1	4	y_{122}	20,0	1,900
17	1/3	1/3	1/3	0	0	55	20	15	3	7	y_{123}	60,0	2,800
18	0	2/3	1/3	0	0	60	25	10	2	3	y_{223}	24,0	2,000

где x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – исходные компоненты смеси, %:

- x_1 – карбид бора (B_4C),
- x_2 – диборид хрома (CrB_2),
- x_3 – мелкодисперсный графит,
- x_4 – фторид натрия (NaF),
- x_5 – бентонит,

- z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 – соответствующие псевдокомпоненты,
- y – обозначение отклика,
- y^I – износостойкость легированного ролика, определяемая его ресурсом (количество поданной роликом проволоки), τ ,
- y^T – средняя толщина диффузионного слоя, мм.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ НАСЫЩАЮЩЕЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БОРА И ХРОМА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

Таким образом, математические модели второго порядка, описывающие зависимость физико-механических свойств (износостойкость (\hat{y}^P) и толщину диффузионного слоя (\hat{y}_i^T)) от химического состава насыщающей смеси, имеют следующий вид:

$$\hat{y}^P = 105 + 36x_2 + 5x_3 + 97x_4 - 72x_5 + 13x_2x_3 + 69x_2x_4 - 40x_2x_5 + 4x_3x_4 - 73x_3x_5 - 17x_4x_5 + 14x_2^2 + x_3^2 + 132x_4^2 + 22x_5^2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_i^T = 3,42 + 1,81x_2 + 0,15x_3 + 3,78x_4 - 3,01x_5 + 0,24x_2x_3 + 1,49x_2x_4 + 2,54x_2x_5 - 0,67x_3x_4 + 3,35x_3x_5 + 3,57x_4x_5 - 0,42x_2^2 + 0,09x_3^2 + 4,74x_4^2 - 2,42x_5^2 \quad (2)$$

По результатам планирования экспериментов проведены контрольные опыты, которые подтвердили правильность математических моделей.

После анализа полученных аналитических зависимостей и с учетом лабораторных исследований, было установлено следующие пределы оптимального содержания каждого компонента в насыщающей смеси для изготовления стальных деталей способом поверхностного легирования:

1) При содержании в насыщающей смеси для поверхностного легирования диборида хрома меньше 20 % от общей массы, идет преимущественно насыщение бором, что приводит к высокой хрупкости диффузионного слоя и, следовательно, к снижению ресурса работы. При содержании CrB_2 в обмазках больше 25 %, идет преимущественно процесс хромирования, что приводит к образованию более мягких диффузионных слоев, обладающих пониженной твердостью, и, соответственно, низким ресурсом.

2) Содержание в насыщающей смеси карбида бора меньше 50 % приводит к получению диффузионных слоев с малой твердостью и снижению ресурса получаемых деталей. При содержании V_4C больше 60 % приводит к преимущественному насыщению бором, к высокой хрупкости получающихся слоев и выходу изделия из строя еще до начала процесса эксплуатации.

3) При содержании в обмазке мелкодисперсного графита в количестве ниже 5 % упрочненные слои получаются малой толщины, и отделение обмазки от поверхности упрочненной детали затруднено. Содержание мелкодисперсного графита больше 15 % от общей массы приводит к образованию тонких упрочненных слоев и, вследствие повышенного газоотделения, возможно появление поверхностных дефектов формы на готовой детали.

4) При содержании в насыщающей смеси бентонита меньше 5 %, возможно осыпа-

ние обмазки в процессе сушки. Содержание бентонита в обмазке больше 7 % дает диффузионные слои малой толщины, что способствует образованию сколов при отделении обмазки из-за ее повышенной адгезии к поверхности детали.

5) При содержании в насыщающей смеси фторида натрия в количестве меньшем 2 % возможно получение диффузионного слоя очень малой толщины, либо полное его отсутствие по причине недостаточной активности смеси. Количество фторида аммония больше 3 % повышает активность смеси и приводит к сплавлению обмазки с упрочняемой деталью, что приводит к невозможности отделения использованной обмазки от готового изделия.

Для решения задачи по определению оптимального соотношения компонентов насыщающей смеси использовалась программа Microsoft Excel, входящая в состав Microsoft Office 2003, в частности надстройка Excel «Поиск решения».

В качестве функции оптимизации было принято уравнение регрессии для износостойкости подающего ролика (1). Значение этой функции должно стремиться к максимуму.

Уравнение регрессии для толщины диффузионного слоя (2) было принято за ограничение. Значение толщины получаемого диффузионного слоя при борохромировании выбиралось в интервале от 0,7 мм до 2,0 мм.

На содержание компонентов в насыщающей обмазке были наложены следующие ограничения:

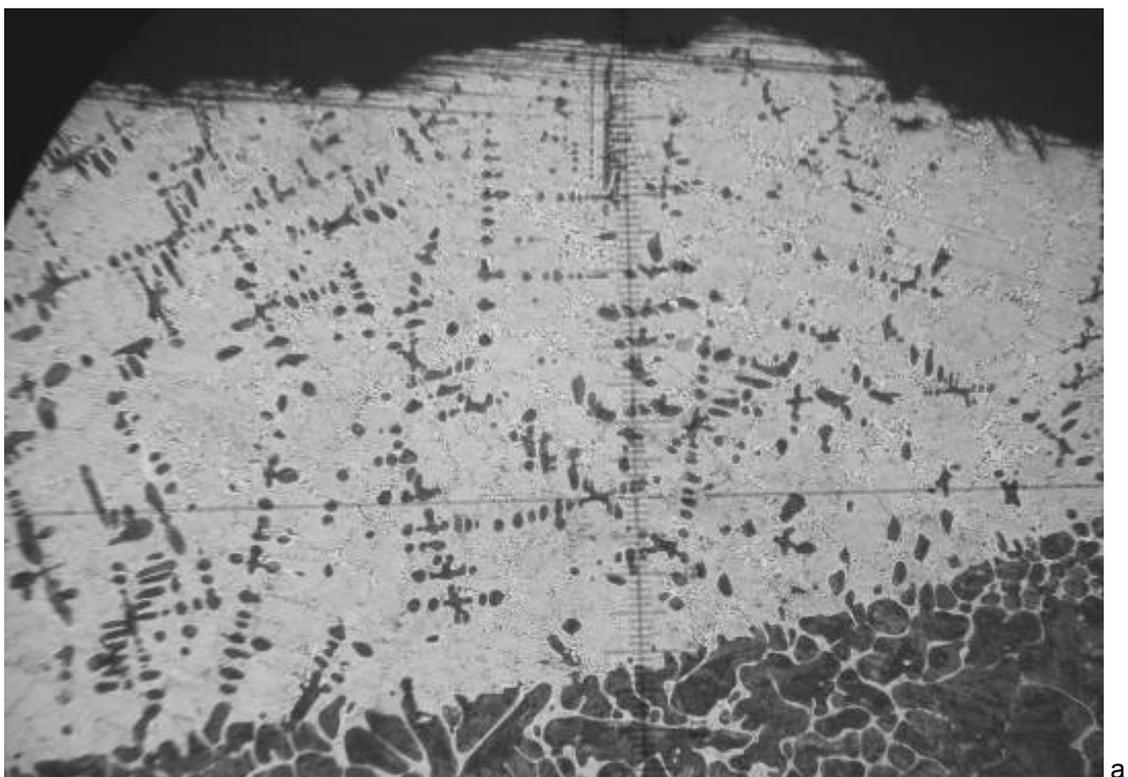
V_4C (x_1) – 50–60 %, CrB_2 (x_2) – 20–25 %, графита (x_3) – 5–15 %, NaF (x_4) – 2–3 %, бентонита (x_5) – 5–7 %.

В результате поиска решений было получено следующее оптимальное соотношение компонентов, которое можно принять за окончательную рецептурную композицию насыщающей смеси для получения стальных деталей методом ЛГМ:

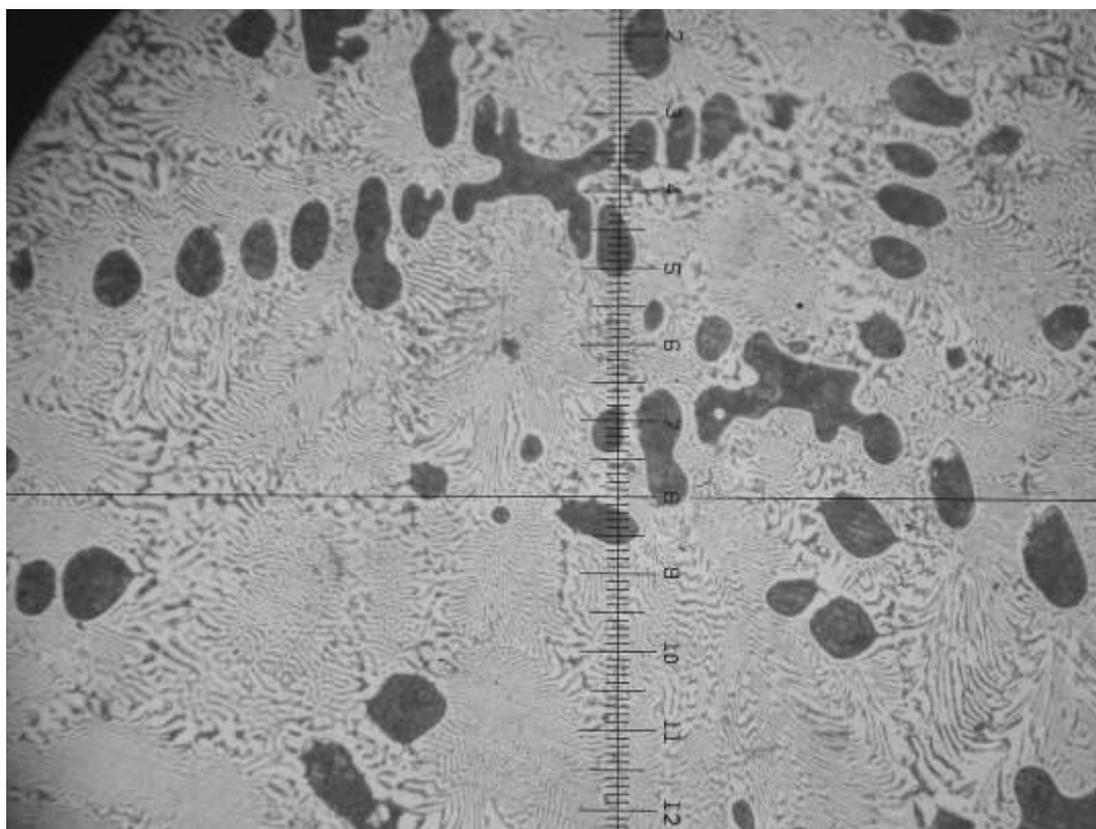
$$53 \% \text{V}_4\text{C} + 25 \% \text{CrB}_2 + 2 \% \text{NaF} + 15 \% \text{графита} + 5 \% \text{бентонита} \quad (3)$$

При этом составе насыщающей смеси расчетное значение ресурса ролика составило 78 т поданной проволоки, толщина борохромированного слоя на изготовленной детали – 1,4 мм.

Расчетные значения свойств были подтверждены экспериментами. Микроструктура полученного упрочненного поверхностного слоя на стали 45Л представлена на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1 – Микроструктура поверхностного слоя на деталях из стали 45Л, полученных литьем по газифицируемым моделям: а) x100, б) x400

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ НАСЫЩАЮЩЕЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ БОРА И ХРОМА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М: Высш. шк., 1985. – 327 с., ил.
2. Гурьев А. М., Иванов С. Г., Власова О. А., Кошелева Е. А., Гурьев М. А., Лыгденов Б. Д. Способ упрочнения стальных деталей // Патент РФ № 2381299 на изобретение. - Опубликовано 10.02.2010, бюл. № 4, заявка № 2008118705/ 02 от 12.05.2008.
3. Гурьев М. А., Иванов С. Г., Кошелева Е. А., Иванов А. Г., Грешилов А. Д., Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Околович Г. А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента // Ползуновский вестник, № 1, 2010.- С. 76-84.
4. Гурьев М. А., Власова О. А., Гурьев А. М. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием// Современные металлические материалы и технологии (СММТ, 2009): Труды международной научно-технической конференции.- СПб.: Изд-во СПб. Политехн. ун-та. 2009. - С.163-166.
5. Иванов С. Г., Гурьев М. А., Власова О. А. Поверхностное легирование стали 25Л бором// Новые материалы. Создание, структура свойства-2008: Труды VIII Всероссийской школы-семинара.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.- С. 141- 143.
6. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борировании инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2009 - № 5 - С. 76-77.
7. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном упрочнении инструментальных сталей [Текст] / Е. А. Кошелева, Е. А. Нестеренко, А. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Труды VI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. - С. 179-183.
8. Новик, Ф. С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлических систем [Текст] / Ф.С. Новик. – М.: Металлургия, 1985. – 256с.