

УДК 621. 791.92: 621. 824.32

Л. М. Нечаев, канд. физ.-мат. наук, проф., **Н. Б. Фомичева**, канд. техн. наук, доц.,
Е. В. Маркова, канд. техн. наук, доц.,
ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, ТулГУ
Тел.: +7 872254690; E-mail: nbf62@yandex.ru

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КРЕМНЕСОДЕРЖАЩИХ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье приводятся результаты исследования наплавочных материалов на основе железо-хром-никель легированных кремнием. Показан характер влияния концентрации кремния на характеристики износостойкости. Получено регрессионное уравнение, связывающее структурные параметры наплавки и характеристики износостойкости.

Ключевые слова: наплавка, износостойкость, кремний

L. M. Nechaev, N. B. Fomicheva, E. V. Markova

STRUCTURAL MODEL OF WEAR RESISTANCE OF SILICON ALLOYING MATERIAL

The article presents the results of a study of surfacing materials based on iron-chromium-Nickel doped with silicon. The nature of the influence of the concentration of silicon on the wear resistance characteristic has been identified. It has been found that regression equation linking the structural parameters of surfacing and wear resistance characteristics.

Key words: surfacing, wear resistance, silicium

Введение

Повышение эксплуатационной стойкости и работоспособности деталей машин и инструментов достигается путем создания защитных покрытий, позволяющих получить композиции, обладающие и высокой долговечностью, и достаточной надежностью. Упрочнение поверхностей деталей методом плазменной наплавки позволяет создавать слои с заданными свойствами.

Одним из важных эксплуатационных свойств наплавочных материалов, работающих в условиях интенсивного изнашивания, является их износостойкость. Установление связи между изнашиванием материала и какими-либо легко определяемыми его характеристиками механических свойств давно привлекает внимание исследователей. Нахождение такой связи значительно упростило бы выбор материалов для разных условий работы.

Существовало мнение о тождественности высокой твердости с высокой износостойкостью, однако разными исследователями было получено, что не всегда твердость определяет износостойкость материала. Только комплексная оценка структуры и свойств позволяет судить о действительном поведении наплавленного металла при изнашивании.

Анализ работ по влиянию легирующих элементов на свойства мартенситно-старяющихся сталей показал, что в качестве упрочняющей добавки перспективно использования Si , который уменьшает равновесную растворимость Mo и Ti в α - и γ - железе, увеличивая одновременно эффект дисперсионного твердения. Хорошо известно также положительное влияние Si на коррозионную стойкость сталей, в особенности, при воздействии кислот и хлоридов.

Целью данной работы стало исследование влияния кремния на структурные особенности и износостойкость наплавочных материалов на основе железо-хром-никель и железо-никель-кобальт.

Основное содержание и результаты работы

В качестве базовых были приняты порошковые мартенситно- стареющие экономнолегированные стали на основе *Fe-Cr-Ni* и *Fe-Co-Ni* с добавками *Si* от 1 до 9 мас.% (табл.1).

Таблица 1. Химический состав МСС на основе *Fe-Cr-Ni*

№	Cr, масс.%	Ni, масс.%	Mo, масс.%	Ti, масс.%	C, масс.%	Si, масс.%
1	10,8	10,1	2,0	0,4	0,017	0
2	11,7	11,1	2,5	0,5	0,02	1
3	10,9	10,2	2,0	0,5	0,019	2
4	11,2	10,9	2,0	0,5	0,018	3
5	11,6	10,6	2,0	0,4	0,017	4
6	11,4	11,1	2,2	0,5	0,018	5
7	10,8	10,5	2,5	0,5	0,017	6
8	10,8	10,3	2,5	0,5	0,02	7
9	11,2	10,9	2,4	0,4	0,017	8
10	11,3	11,0	2,3	0,5	0,018	9

Примечание: содержание в сплавах ванадия - 0,1...0,3%; марганца - 0,9... 1,1%; примесей внедрения: 0,05...0,06% азота и 0,021...0,023% кислорода.

Таблица 2. Химический состав МСС на основе *Fe-Co-Ni*

№	Co, масс.%	Ni, масс.%	Mo, масс.%	Ti, масс.%	C, масс.%	Si, масс.%
1	8,8	18,1	5,0	0,5	0,02	0
2	8,7	18,1	4,8	0,7	0,018	1
3	8,9	18,2	5,0	0,5	0,019	2
4	9,2	17,9	5,2	0,5	0,017	3
5	9,6	17,6	5,5	0,5	0,02	4
6	9,4	18,1	5,2	0,5	0,02	5
7	9,8	18,5	5,5	0,45	0,02	6
8	9,8	18,3	5,5	0,6	0,02	7
9	9,2	17,9	5,5	0,5	0,019	8
10	9,3	19,0	4,9	0,45	0,019	9

Примечание: содержание в сплавах ванадия - 0,3...0,32%; марганца - 0,3... 0,8%; примесей внедрения: 0,05...0,06% азота и 0,021...0,023% кислорода.

Для наплавки использовали порошки с фракциями от 40 до 400 мкм. Анализировали структуру, свойства и износостойкость МСС, отличающихся содержанием кремния. Изучение закономерностей структурообразования наплавочных материалов системы *Fe-Cr-Ni*, разработка рекомендаций по рациональным режимам термической обработки, выявление особенностей при проведении наплавки потребовало постановки сравнительных экспериментов на материалах, полученных традиционным методом литья.

Химический состав литых сплавов систем *Fe-Cr-Ni* и *Fe-Co-Ni* приведен в табл.3 и 4.

Таблица 3. Химический состав литых *Fe-Cr-Ni* мартенситно-старееющих сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)					
	Ni	Mo	Co	Ti	Al	C
H18K9M52T	18,5	4,9	8,8	0,9	0,15	0,03
00H18K12M5T2	18,7	5,2	11,9	1,8	0,20	0,03

Таблица 4. Химический состав литых *Fe-Co-Ni* мартенситно-старееющих сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)					
	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	C
00X11 H10M2T	10,7	9,5	1,9	-	0,9	0,02
03X12H8K5M2T	11,5	7,8	2,2	4,9	1,2	0,03

Расчетная модель изнашивания в структурах типа «Шарпи» (гетерогенные структуры, матрица которых содержит мелкодисперсные твердые включения избыточной фазы) (рис.1), предполагает, что износостойкость прежде всего контролируется плотностью высокотвердых частиц второй фазы и протяженностью границ зерна, по которым выделяется хрупкая фаза.

Комплексную оценку взаимообусловленности процесса изнашивания и структурных факторов для наплавленной стали, можно сделать по значениям относительной износостойкости ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_0}{\omega_i} \quad (1)$$

где ω_i - текущее значение потери веса, а в качестве параметра ω_0 - принято значение износа наплавки, не содержащих дисперсных включений силицидной фазы, (т.е. базовый состав без добавок кремния).

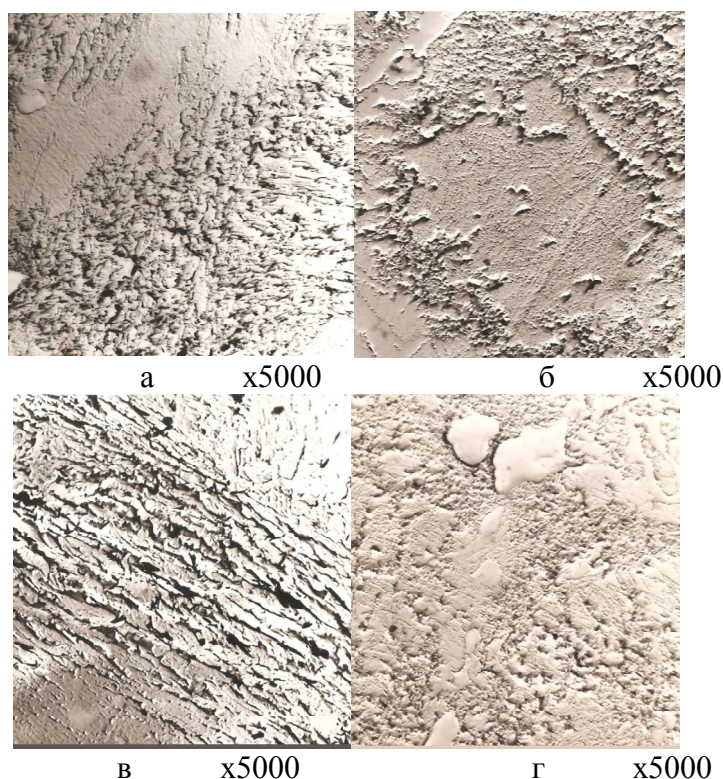


Рисунок 1. Особенности структуры наплавочных материалов на основе железо-хром-никель (а,б) и железо-никель-кобальт (в, г)

На рис. 2 представлен характер влияния фактора концентрации кремния в наплавленных сталях на относительную износостойкость поверхностного слоя.

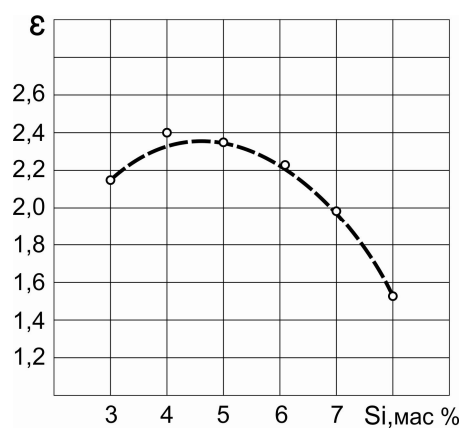


Рисунок 2. Влияние кремния на относительную износостойкость (ε) железо-хром-никелевого наплавочного материала

Видно, что наибольшим значением ε - параметра обладают наплавки с содержанием кремния ~4% Si. В этом случае «работают» основные структурные процессы, такие как: интерметаллидное упрочнение при старении; силицидное упрочнение и создание «оболочковой» структуры из оксидов кремния SiO_2 . Для характеристики взаимобусловленности структуры и износа выбирали монотонно убывающий участок кривой

зависимости $\varepsilon = f(HRC)$, соответствующий концентрации кремния от 1% Si и выше (рис.2). Видно, что наибольшей износостойкостью (2,4 - 2,2) обладают наплавочные материалы, содержащие ~ 4 - 6% Si, наименьшей (~1,5)- МСС- стали с 8% Si.

Структурные исследования Fe-Cr-Ni - кремнийсодержащих наплавочных МСС- сталей позволили сделать вывод, что упрочнение и повышение твердости в исходном состоянии достигается за счет образования при легировании кремнием выше ~ 4% Si дисперсных частиц силицидов ($CrSi_2$, $MoSi_{0,65}$), а также оксида кремния (SiO_2). В процессе старения как в кремнийсодержащих, так и в безкремнистых материалах происходит образование интерметаллидных соединений типа Ni_3Ti и $CrNiMoTi$, также повышающих твердость наплавленного слоя. На основании изложенного, твердость наплавки напрямую связывалась с количеством дисперсных частиц избыточных фаз.

Вторым модельным аспектом является тот факт, что формирующиеся в материалах наплавки, содержащие более ~ 4% Si, частицы SiO_2 образуют «оболочковую» структуру. При этом структура α - фазы измельчается, в результате чего твердость дополнительно возрастает.

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости плотности дисперсных частиц и твердости наплавленного слоя от содержания кремния. Было получено, что твердость наплавки увеличивается при измельчении матрицы по фактору размера зерна и возрастании плотности дисперсных частиц второй фазы.

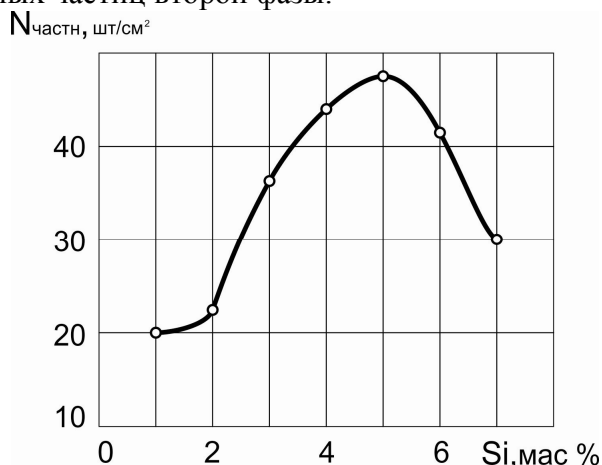


Рисунок 3. Влияние кремния на плотность, формирующихся в наплавках дисперсных силицидных частиц

Проведенная графическая аппроксимация кривой функции зависимости твердости от размера зерна позволила получить следующие выражения:

$$HRC = \frac{45x}{e^{D_z}} \tag{2}$$

$$x = 1 - \frac{N_{\text{кр}} - N_i}{N_{\text{кр}}} \tag{3}$$

где $N_{\text{кр}}$ - максимальное количество дисперсных частиц, N_i - текущее значение количества частиц при данном содержании кремния или получаемой твердости.

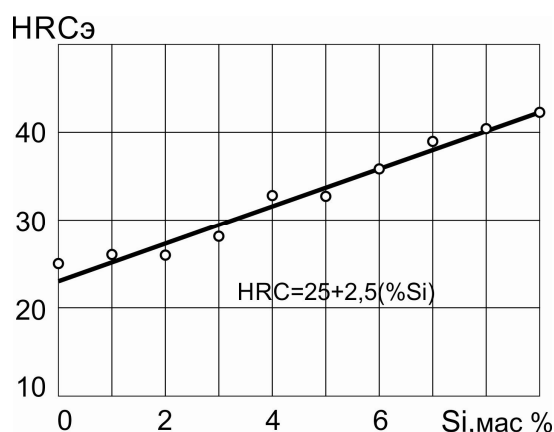


Рисунок 4. Влияние количества кремния на твердость наплавочных материалов

Введение для каждой концентрации кремния поправки n в зависимость HRC от размера зерна D_3 позволило повысить точность аппроксимации. Полученные выражения (2) и (3) позволяют представить основное выражение для оценки износостойкости наплавочных слоев ϵ в виде:

$$\epsilon = \epsilon_0 / (HRC)^n, \tag{4}$$

где функция $HRC = F(D_3; N_{kp})$ была определена уравнением (4).

Характеристика ϵ_0 определяется как значение износостойкости ϵ в момент исчезновения дендритной структуры (при содержании кремния более $\sim 4\%$ Si).

Параметр n является функцией искажения кристаллической решетки $\alpha(\alpha')$ - фазы, которая качественно характеризуется изменением параметра a_a . Данные по влиянию кремния на период решетки $\alpha(\alpha')$ - фазы показали, что геометрическая аппроксимация зависимостей a_a от температуры старения для наплавочных материалов с различным содержанием кремния может быть описана следующим выражением:

$$a_a = a_{o/T} \tag{5}$$

Поскольку $a_o/a_a \sim 1$, то $K = 1/lqT$, а зависимость периода решетки α' - фазы от концентрации кремния или от соответствующей этому содержанию твердости наплавочек будет иметь вид:

$$a_a = 2,875 - 1,3 \cdot 10^{-3} (HRC - 25) \tag{6}$$

Исходя из полученных зависимостей параметров решетки $\alpha(\alpha')$ - фазы от температуры старения параметр n может быть описан функцией:

$$n = 9 - Km|500 - T| \tag{7}$$

K_T — температурный коэффициент, равный $35 \times 10^{-3} (1/^\circ C)$, T - температура старения ($^\circ C$).

В расчетную модель износостойкости гетерофазных структур можно включить также соотношение модулей упругости E_u/E_m . Наибольшее значение это соотношение примет при высоком модуле дисперсных частиц (E_u) и низком значении упругих констант основы (E_m), т.е. у наплавочных материалов, легированных кремнием в количестве от 4 до 9% Si. В этом диапазоне концентраций кремния реализуется и силицидное и

интерметаллидное упрочнение. Причем, если в наплавках с содержанием кремния 1,0-3% Si структура матрицы мартенситная, то в Fe-Cr-Ni наплавочных материалах с высоким содержанием кремния (4-9% Si) этой структурой является ферритная фаза, имеющая, по сравнению с мартенситной структурой более низкий модуль упругости.

Заключение

Таким образом, соотношение E_v/E_m связано со структурой материала и может регулироваться в кремнийсодержащих Fe-Cr-Ni - наплавках за счет целенаправленного формирования дисперсных частиц избыточных фаз и матричных структурных составляющих. Полученные выражения (2-7) оценивающие износостойкость наплавочных материалов имеют больше структурный, нежели технологический характер.

Для получения конкретной связи износостойкости материала со структурой, параметрами упрочнения и составом (в данном случае изменением концентрации кремния МСС- сталях) была построена структурно- технологическая модель изнашивания.

Используя комплекс всех полученных при изучении структурной модели связей между износостойкостью, температурой старения (Т), а также диаметром зерна (D_3) α - фазы и плотностью частиц второй фазы (N), было разработано регрессионное уравнение, связывающее все перечисленные параметры.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 2,44 \cdot 10^{-2} + 0,884 \cdot T_{cm} + 1,68 \cdot 10^{-3} T_{cm}^3 - 7,52 \cdot 10^{-6} T_{cm}^5 + 5,8 \cdot 10^{-9} T_{cm}^4 \\ & - 2,35 \cdot N_4 + 0,217 \cdot N_4^2 \cdot 10^{-6} - 7,45 \cdot 10^{-3} N_4^3 + 8,1 \cdot 10^{-5} N_4^4 - 23,69 \\ & \cdot D_3 + 0,728 \cdot D_3^2 - 9,08 \cdot 10^{-3} D_3^3 + 3,97 \cdot 3,97 \cdot 10^{-4} D_3^4 \end{aligned}$$

С использованием полученного уравнения можно решить задачу оптимизации по критерию износостойкости, т.е. оценить абразивную износостойкость материала на основе данных по температуре старения и структурного микроанализа. На основании проведенного регрессионного анализа предложена и обоснована структурно-технологическая модель изнашивания наплавочных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апаев, Б. А. Исследование химической микронеоднородности твёрдых растворов хрома и никеля в железе / Б. А. Апаев, С. А. Мадянов, Б. Н. Вороненко // Физика и электроника твёрдого тела. – 1981. – Вып. IV. – С. 64-70.
2. Гребеньков, С. К. Деформация и разрушение низкоуглеродистых мартенситных сталей / С. К. Гребеньков, В. А. Скуднов, А. А. Шацов. – МиТОМ, 2016. – №2. – С. 33-38.
3. Тарасенко, Л. В. Термическая обработка коррозионно-стойкой стали для изготовления силоизмерительных упругих элементов / Л. В. Тарасенко, Т. А. Красов, М. В. Унчикова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 82-88.
4. Нечаев, Л. М. Изучение параметров износостойкости легированных кремнием наплавочных материалов / Л. М. Нечаев, Н. Б. Фомичева, Е. В. Маркова, Г. В. Сержантова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н.Б.Демкина. – Тверь:ТГТУ, 2016. – Вып. 9. – С. 52-55.
5. Особенности кристаллизации сталей системы Fe-Cr-Ni-C / С. Г Чернявская [и др.] // Специальные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1973. – Вып.2. – С. 75-80.

Поступила в редколлегию 08.03.2017 г.