

В.А. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук,
С.В. БОРИСОВ,
О.С. БЕЛЬКО,
В.Г. БОРИСОВ (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ НА СТАЛИ 20X13, ПОЛУЧЕННЫХ В СИСТЕМЕ ХРОМ-УГЛЕРОД С ВВЕДЕНИЕМ В РЕАКЦИОННУЮ СМЕСЬ ЛЕГКОПЛАВКИХ ДОБАВОК

Введение. Цементация сталей, содержащих 12–13 % хрома, применяется для повышения ресурса работы штампового инструмента для вырубки, вытяжки, гибки [1]. Для вырубных штампов небольшого сечения используется сталь 20X13, которая после цементации, закалки и низкого отпуска имеет следующие свойства и структуру: цементованный слой толщиной 0,3–0,4 мм представляет собой мартенсит с большим количеством карбидных включений и твердостью 65–68 HRC и вязкой сердцевиной, твердость которой составляет 42–45 HRC. Такое сочетание свойств поверхности и сердцевины позволяет значительно повысить ресурс работы вырубных штампов. Разработанные порошковые смеси для цементации высокохромистых сталей имеют недостаток – низкую насыщающую способность (для получения цементованного слоя толщиной 0,3–0,4 мм требуется выдержка 6–8 ч при $t = 1000\text{--}1050$ °С).

Целью данной работы является разработка порошковых смесей высокой активности для цементации высокохромистых сталей, которые обеспечивают структуру диффузионного слоя, состоящую из твердых включений карбидов, находящихся в мартенситной матрице.

Методика эксперимента. Для получения оптимальных свойств диффузионных слоев был применен последовательный симплекс метод планирования эксперимента с использованием правильного симплекса [2–4].

В качестве факторов, входящих в состав смеси, были выбраны следующие компоненты:

- хромирующая смесь, полученная методом алюмотермии – (30 % Al_2O_3 + 21 % Al + 49 % Cr_2O_3) + 0,5 % NH_4Cl ;
- цементирующая смесь – (85 % древесный уголь + 15 % $NaHCO_3$);
- легкоплавкие добавки Cu , Zn , Sb , $SnCl_2 \cdot 2H_2O$, CoO , MoO_3 .

Температура и время насыщения поддерживались постоянными: $t = 1050$ °С, $\tau = 4$ ч. Таким образом, симплекс был составлен для количества факторов $k = 8$.

Шаги варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Шаг варьирования факторов

Фактор	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Шаг, %	5	5	5	5	5	5	5	2

Значения факторов на основном (нулевом) уровне \tilde{X}_i^0 и интервалы варьирования были приняты по данным предварительных исследований для стали 45 с применением метода ПСМ [5].

В качестве параметров оптимизации (y_{iu}) были выбраны следующие: толщина диффузионного слоя, мкм; твердость после закалки (950 °С + масло), HRC; наличие твердых частиц в слое, их структура в баллах.

Для определения наличия твердых частиц и их дисперсности был принят ранговый параметр [4] по 4-х бальной шкале (0–3 балл):

- 0 балл – очень плохо (отсутствие слоя);
- 1 балл – плохо;
- 2 балл – хорошо;
- 3 балл – отлично.

Температура нагрева под закалку 950 °С позволяет получить максимальную твердость диффузионных слоев на стали 20Х13, что отмечено в работе [6].

Для оценки полученных результатов был выбран обобщенный отклик [3]:

$$\sum_{i=1}^m a_i \left(\frac{y_{iu} - y_{i0}}{y_{i0}} \right)^2 = Y_u,$$

где y_{iu} – значение индивидуального отклика параметра в некотором опыте, где $i = 1, 2, \dots, m$ – число откликов, $u = 1, 2, \dots, n$ – число опытов; y_{j0} – желаемое значение («идеал») параметра; a_i – «вес» параметра оптимизации; Y_u – обобщенный отклик.

Параметры оптимизации и их желаемые значения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры оптимизации

Параметры оптимизации	Желаемое значение	«Вес» параметра
Толщина слоя, мкм	1500	0,3
Твердость после закалки, HRC	70	0,4
Наличие твердых частиц, балл	3	0,3

Матрица для симплекса в кодированных координатах представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Координаты точек симплекса в кодированном масштабе

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
5	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
6	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
7	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	0

Значения факторов в кодированном X_j и натуральном \tilde{X}_j масштабах связаны соотношениями:

$$X_j = \frac{\tilde{X}_j - \tilde{X}_j^0}{\Delta \tilde{X}_j};$$

$$\tilde{X}_j = \tilde{X}_j^0 + \Delta \tilde{X}_j \cdot X_j,$$

где \tilde{X}_j^0 – значение фактора с номером i на нулевом уровне в натуральной системе координат; $\Delta \tilde{X}_j$ – шаг варьирования i -го фактора.

Координаты новой вершины (точки) симплекса находились по формуле:

$$\tilde{X}_{j,n+1} = \frac{2}{k} \sum_{u=1}^k \tilde{X}_{j,u} - \tilde{X}_j^*,$$

где $n = k + 1$ – число точек (опытов) в исходном симплексе; k – число факторов; $\tilde{X}_{j,n+1}$ – координата новой точки в натуральных координатах для фактора с номером i (суммирование ведется по всем опытам, кроме отвергнутых); \tilde{X}_j^* – координата данного фактора в отвергнутом (худшем) опыте.

Обсуждение результатов. Результаты исследований представлены в таблице 4. Наихудшие результаты соответствуют точке № 7 симплекса, по отношению к которой вычислялись координаты новой вершины симплекса. Наилучшие результаты соответствуют точке № 15. Последующие опыты в точках № 16 и № 17 дают результаты несколько ниже значений точки № 15, что говорит о закливании симплекса. Это позволило принять решение об окончании исследований.

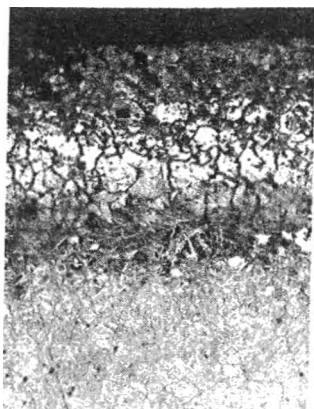
Таблица 4 – Результаты проведенных опытов

№ точки	Толщина слоя, мкм	Твердость после закалки, HRC	Балл твердых частиц	Y_u
1	2	3	4	5
1	1050	64	2	0,105
2	700	63	2	0,320
3	800	62	1	0,238
4	1000	68	3	0,053

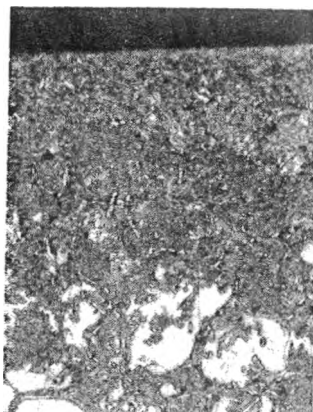
1	2	3	4	5
5	900	67	2	0,128
6	100	47	1	0,437
7	10	44	0	0,651
8	20	45	0	0,649
9	200	53	1	0,418
10	15	45	0	0,645
11	15	44	0	0,647
12	15	45	0	0,645
13	155	45	1	0,461
14	900	69	3	0,067
15	1400	70	3	0,020
16	1100	69	3	0,040
17	250	60	1	0,385

Исследование твердости поверхности закаленных образцов показало, что максимальная твердость достигает 69–70 HRC в точках №№ 14, 15 и 16 (таблица 4).

На рисунках 1–3 представлены микроструктуры диффузионных слоев. Очевидно, что структура диффузионных слоев включает три зоны. Поверхностная зона темного цвета состоит из большого количества включений карбидов зернистой формы и мартенсита (рисунки 2, б; 3, б). Толщина этой зоны находится в пределах от 100 мкм (рисунок 4) до 600 мкм (рисунок 2). Во второй зоне уменьшается количество зернистых карбидов, появляются остатки карбидной сетки по границам зерен, увеличивается количество мартенсита (рисунки 4, а; 5, а, б). Толщина второй зоны колеблется от незначительной толщины (рисунок 2, а) до 400–500 мкм (рисунок 4, а). Структура третьей зоны состоит из мартенсита, аустенита и следов сетки карбидов (рисунок б).



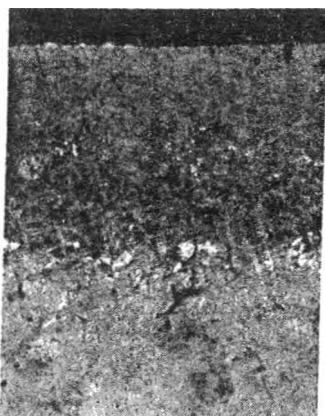
а



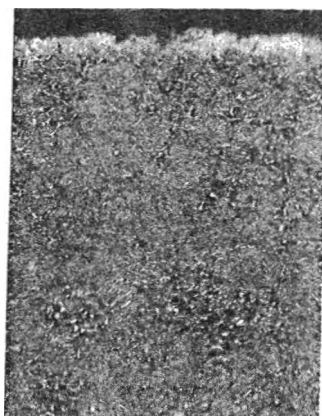
б

а – структура слоя, $\times 125$; б – структура поверхностной зоны I, $\times 500$

Рисунок 1 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 14



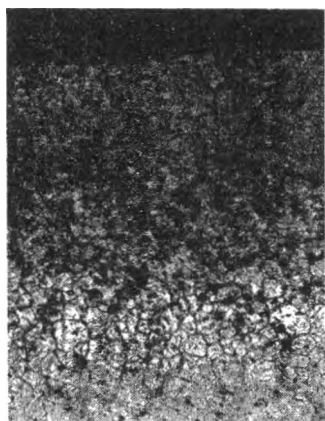
а



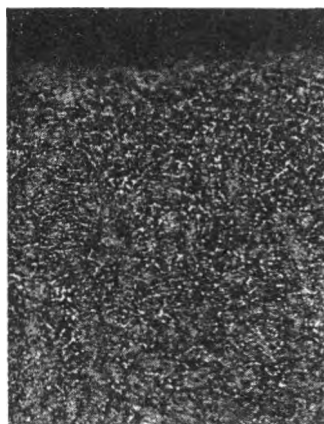
б

а – структура слоя, $\times 125$; б – структура поверхностной зоны I, $\times 500$

Рисунок 2 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 15



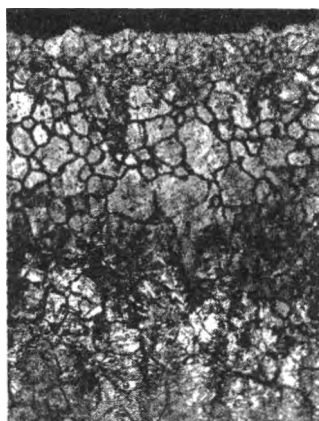
а



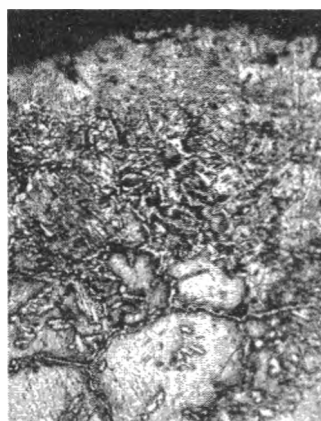
б

а – структура слоя, $\times 125$; б – структура поверхностной зоны I, $\times 500$

Рисунок 3 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 16



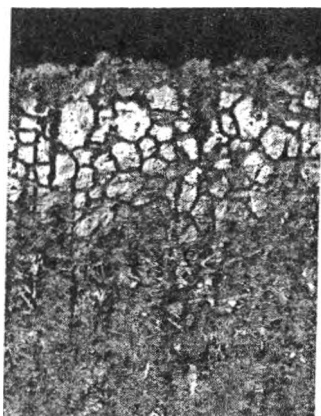
а



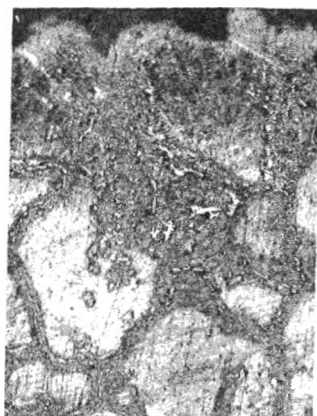
б

а – структура слоя, $\times 125$; б – структура поверхностной зоны II, $\times 500$

Рисунок 4 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 1



а



б

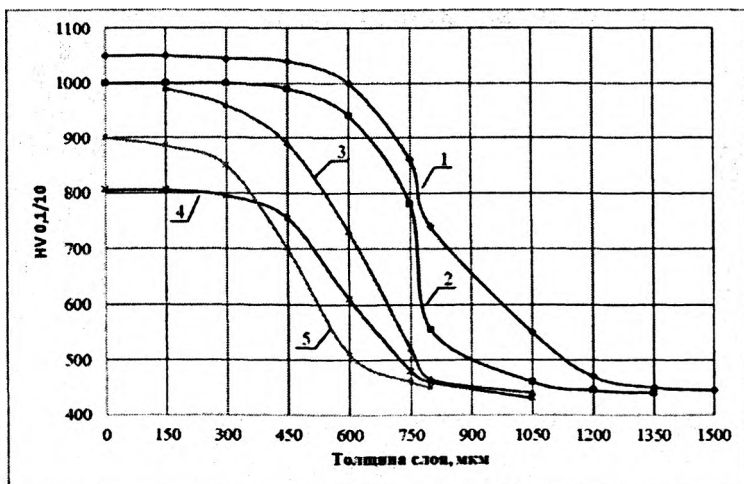
а – структура слоя, $\times 125$; б – структура поверхностной зоны II, $\times 500$

Рисунок 5 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 5



Рисунок 6 – Микроструктура диффузионного слоя в точке № 16: структура поверхностной зоны III, $\times 1000$

На рисунке 7 представлено распределение микротвердости по толщине цементованных слоев.



1 – точка № 15; 2 – точка № 16; 3 – точка № 14; 4 – точка № 5; 5 – точка № 1

Рисунок 7 – Распределение микротвердости по толщине диффузионных слоев

Как видно из рисунка, максимальные значения микротвердости 1000–1050 HV_{0,1/10} наблюдаются в первой зоне, при этом значения твердости остаются постоянными по всей толщине зоны. Значение высокой твердости можно объяснить наличием большого количества мелкодисперсных карбидов в структуре. Отсутствие данной зоны в диффузионных слоях приводит к понижению микротвердости из-за уменьшения количества карбидов. Микротвердость второй зоны плавно уменьшается по толщине из-за снижения в структуре количества карбидов. Микротвердость третьей зоны находится на уровне значений твердости основы.

Заключение. Применение последовательного симплексного метода при оптимизации состава карбюризатора для цементации высокохромистых сталей позволило:

1. Увеличить скорость формирования диффузионного слоя высокой твердости в 1,8–2,2 раза по сравнению с известными карбюризаторами и получать диффузионные слои с включениями карбидов до 700 мкм и общей толщиной 1400 мкм.

2. Повысить твердость поверхности упрочняемой стали 20X13 до 69–70 HRC.

3. Получить одинаковые значения микротвердости 1000–1050HV_{0,1/10} по всей толщине карбидной зоны цементованного слоя.

Литература

1. Ляхович, Л.С. Влияние хрома на глубину и свойства цементованного слоя низкоуглеродистой стали / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, А.Н. Ростовцев // *Металловедение и термическая обработка металлов*: сб. науч. тр. – М.: МиТОМ. – 1975. – № 8. – С. 9–12.
2. Барский, Л.А. Проблемы планирования эксперимента / Л.А. Барский, Ю.Б. Рубинштейн. – М.: Наука, 1969. – 275 с.
3. Рузинов, Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов / Л.П. Рузинов. – М.: Химия, 1972. – 200 с.
4. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
5. Стефанович, В.А. Исследование процесса многокомпонентного насыщения углеродом и металлами стали 45 / В.А. Стефанович, С.В. Борисов, Е.С. Серегина // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск: Бел. наука, 2006. – Вып. 30. – С. 115–121.
6. Ляхович, Л.С. Карбохромирование стали / Л.С. Ляхович, Э.Д. Щербаков // *Металловедение и термическая обработка металлов*: сб. науч. тр. – М.: МиТОМ. – 1974. – № 10. – С. 11.

УДК 621.785.539

Л.А. АСТРЕЙКО, канд. техн. наук (БНТУ)

КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ЦИНКА

Основными эксплуатационными характеристиками защитных покрытий являются антикоррозионные свойства, устойчивость к абразивному изнашиванию и высокая степень сцепления покрытия