

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барановский Э. Ф., Ильющенко В. М., Короткин Г. П. Изготовление цинковых анодов литьем в кокиль // *Литье и металлургия*. – 2000. – № 4. – С. 19–20.
2. Марукович Е. И., Барановский Э. Ф., Ильющенко В. М., Короткин Г. П. Изготовление цинковых анодов на опытном производстве ИТМ НАН Беларуси // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2. – С. 159–161.
3. Барановский Э. Ф., Ильющенко В. М., Петруня Ю. В., Пумпур В. А. Установка горизонтального непрерывно-шагового литья // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 3. – С. 73–74.
4. Барановский Э. Ф., Ильющенко В. М., Пумпур В. А., Петруня Ю. В. Численные исследования формирования цинковой полосы при горизонтальном непрерывно – шаговом литье // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 1. – С. 106–109.
5. Барановский Э. Ф., Пумпур В. А. Математическая модель и программа расчета теплообмена при непрерывном литье полосы в кристаллизатор «колесо-лента» // *Литье и металлургия*. – 2000. – № 1. – С. 28–30.
6. Барановский Э. Ф., Ильющенко В. М., Пумпур В. А. и др. Разработка непрерывного литья в роторный кристаллизатор цинковой полосы для изготовления анодов // *Литье и металлургия*. – 2001. – № 2. – С. 44–48.

УДК 621.785

В. А. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук, С. В. БОРИСОВ (БНТУ),  
Е. С. СЕРЕГИНА (БМЗ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ УГЛЕРОДОМ И МЕТАЛЛАМИ СТАЛИ 45

Целью настоящей работы является получение диффузионных слоев высокой твердости в системе легирующий элемент – углерод, структура которых представляет вкрапления твердых включений карбидов, интерметаллидов в мартенситной матрице (принцип Шарпи). При этом предполагается получение диффузионных слоев значительной толщины, что позволит проводить шлифование изделий в окончательный размер после их термической обработки. Исследование проводили в порошковых смесях с определенным соотношением хромирующего и цементирующего карбюризатора. Разработанные смеси для комплексной химико-термической обработки можно будет использовать для упрочнения пуансонов с толщиной рабочей части 1–5 мм. При этом поверхностный слой будет обладать высо-

кими твердостью и износостойкостью, а сердцевина – значительной вязкостью, позволяющей воспринимать динамические нагрузки. В качестве материала предполагается использовать углеродистые стали 40, 45, 50, а также низколегированные 40Х, 38ХМА, 40ХН, 40ХНФ и др.

За основу исследований, проведенных ранее на кафедре «Металловедение и термическая обработка металлов» БПИ [1], были взяты результаты насыщения углеродистых сталей хромом и углеродом. В данной работе отмечается, что при насыщении углеродистой стали совместно углеродом и хромом можно получить различные структуры диффузионных слоев.

В настоящей работе выполнены исследования по получению плотных (беспористых) диффузионных слоев, структура которых соответствовала бы принципу Шарпи, в системе углерод – хром с дополнительным введением в реакционную смесь легкоплавких добавок, а также других карбидообразующих элементов.

Для предварительных исследований был выбран состав смеси и параметры насыщения для стали 45 и У8. В качестве хромирующей составляющей был выбран состав на основе феррохрома (50% X75 + 50%  $Al_2O_3$ ) + 1,5%  $NH_4Cl$ , в качестве цементирующей – 85% С (уголь) + 15%  $NaHCO_3$ . В качестве добавок применяли порошки химических элементов (медь, цинк, сурьма и др.), а также химические соединения тугоплавких карбидообразующих металлов, имеющих температуру плавления ниже температуры насыщения. Химико-термическую обработку проводили при температурно-временных параметрах  $t = 1100\text{ }^\circ\text{C}$  в течении  $\tau = 5\text{ ч}$ . Насыщение осуществлялось в металлических тиглях с плавким затвором.

Предварительные эксперименты диффузионного насыщения стали 45 из порошковой смеси, содержащей 20% цементирующей смеси и 50–60% хромирующей смеси, остальное – активатор и легкоплавкие элементы в определенном соотношении, позволили получить диффузионный слой 1 мм, структура которого представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, диффузионный слой состоит из мелкозернистого перлита с наличием карбидной сетки и многочисленных зернистых включений, балл зерна равнялся 7–8.

После термической обработки (закалки  $860\text{ }^\circ\text{C}$  + вода и низкого отпуска  $180\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$ ) поверхностная твердость достигала 67–68 HRC.

Выполненный микрорентгено-спектральный анализ показал наличие хрома в диффузионном слое. При химико-термической обработке хром проникает на глубину 50 мкм и его концентрации составляет 1–1,5%, при этом на самой поверхности (толщиной 3–5 мкм) концентрация хрома составляет несколько десятков процентов.

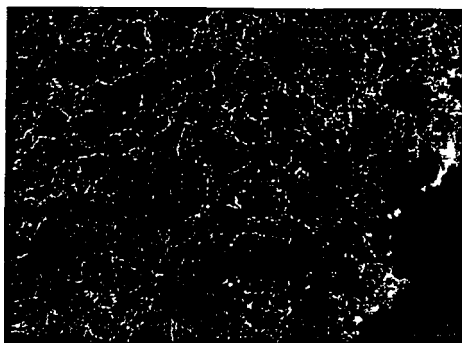


Рис. 1. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 после ХТО.  $\times 240$

Исходя из предварительных опытов, были выбраны компоненты для оптимизации насыщающей смеси, в качестве легкоплавких элементов использовались цинк, сурьма, соли  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , а также оксиды ванадия, молибдена, вольфрама и других элементов.

Для дальнейшей оптимизации свойств был применен последовательный симплекс-метод (ПСМ) с использованием правильного симплекса [2]. Для оценки полученных результатов был выбран обобщенный отклик  $\sum_{i=1}^m a_i \left( \frac{y_{iu} - y_{i0}}{y_{i0}} \right)^2 = Y_u$ , где  $Y$  – обобщенный отклик,  $a_i$  – «веса» параметров оптимизации (табл. 1).

В качестве параметров оптимизации были выбраны следующие: твердость после закалки ( $840^\circ\text{C} + \text{масло}$ ), твердость после отпуска, толщина слоя, наличие твердых частиц в слое, балл зерна после насыщения. Параметры оптимизации и их желаемые значения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры оптимизации

Параметр оптимизации	Желаемое значение	«Вес» параметра
Твердость после закалки HRC	70	0,1
Твердость после отпуска HRC	55	0,2
Толщина слоя, деление	250	0,2
Наличие твердых частиц, балл	5	0,3
Балл зерна после насыщения	10	0,2

В качестве факторов были выбраны компоненты, входящие в состав смеси. Шаги варьирования для факторов представлены в табл. 2. Таким образом, симплекс был составлен для количества факторов  $k = 8$ . Матрица для симплекса в кодированных координатах приведена в табл. 3.

Таблица 2. Шаг варьирования факторов

Фактор	Шаг, %	Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
$x_1$	5	1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
$x_2$	5	2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
$x_3$	5	3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
$x_4$	5	4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
$x_5$	5	5	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
$x_6$	5	6	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
$x_7$	5	7	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
$x_8$	2	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
		9	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3. Координаты точек симплекса

Расчет новой точки симплекса проводился следующим образом:

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

где  $N = k + 1$  – число точек в исходном симплексе;  $\tilde{x}_{j,N+1}$  – координата новой точки в натуральных координатах для фактора с номером  $j$  (суммирование ведется по всем опытам, кроме отвергнутого).

В соответствии с ПСМ были проведены опыты. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Таблица результатов проведенных опытов

Номер точки	Балл зерна после насыщения	Толщина слоя, дел	Балл твердых частиц	Твердость после закалки, HRC	Твердость HRC после отпуска (400 °C)
1	6	290	1	63	44,5
2	4	140	1	62	44
3	4	280	1	64	45,5

Номер точки	Балл зерна после насыщения	Толщина слоя, дел	Балл твердых частиц	Твердость HRC после закалки	Твердость HRC после отпуска (400 °С)
4	3	350	1	65	46
5	4	70	1	64	45
6	7	~840	2	61	44,5
7	4	210	1	62	45,5
8	4	210	1	63,5	46
9	4	210	1	62,5	45,5
10	4-5	140	1	64	45,5
11	7	70	1	64	46
12	7	300	1	64,5	48
13	7	1050	1	63	48,5
14	6-7	920	1	63,5	47
15	6	1050	0	63,5	48
16	6	480	1	64,5	48,5
17	7	1050	2	64	48,5

В результате проведенных экспериментов с использованием ПСМ были получены диффузионные слои на стали 45 со следующими оптимальными параметрами: температурно-временные параметры  $t = 1050$  °С, время насыщения  $\tau = 4$  ч, балл зерна перлита – 7, толщина слоя ~1400 мкм. Структура слоя после насыщения представляет собой мелкозернистый перлит с многочисленными включениями мелких твердых частиц (рис. 2).

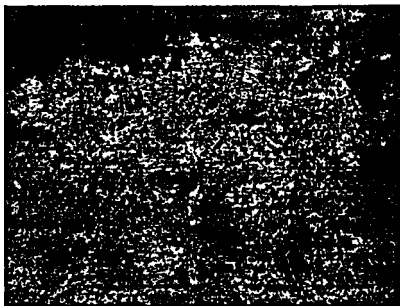


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 после ХТО.  $\times 240$

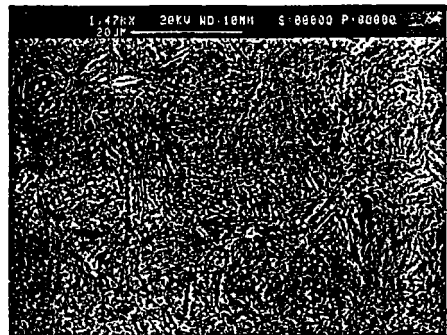


Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 после ХТО и закалки.  $\times 1000$

Цементация стали 45 в стандартном карбюризаторе при перечисленных выше параметрах обеспечивает толщину слоя 1300–1400 мкм с наличием в поверхностной зоне грубой цементитной сетки и имеет балл зерна 3–5.

Термообработку–закалку осуществляли в двух средах в воде и масле с температуры 840 °С и последующим низким отпуском 180–200 °С. Структура стали после термообработки – мелкоигольчатый мартенсит с мелкодисперсными включениями твердых частиц (рис. 3).

Более подробное исследование микроструктуры проводили на электронном микроскопе «Stereoscan 200». Как видно из рисунка, мелкодисперсные включения имеют размеры 1–2 мкм. Темные круглые включения на фотографии – углубления в матрице, полученные в результате приготовления шлифов (рис. 4), из-за выкрошивания твердых частиц.

Измерение твердости после ТО показало следующие результаты: экспериментальные образцы при закалке в воду – 67–69 HRC, при закалке в масле – 65–66; образцы после цементации при закалке в воду – 64–67 HRC, после закалки в масло – 61–64 HRC.

Результаты измерения микротвердости экспериментальных образцов после ТО представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, микротвердость по глубине диффузионного слоя изменяется в пределах 9400–11000 МПа (микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 200 г), что соответствует 68–70 HRC.

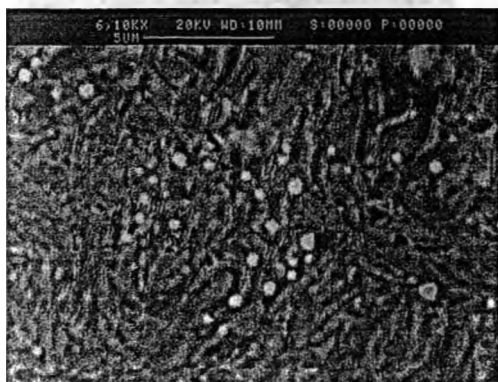


Рис. 4. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 после ХТО и закалки.  $\times 4200$

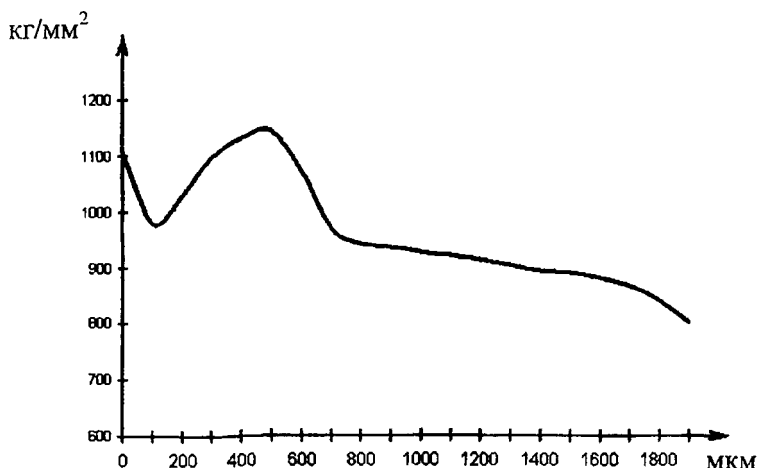


Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя стали 45

В заключение можно сделать следующие выводы:

1) ХТО из оптимизированных смесей позволяет получить после закалки и отпуска бóльшую твердость (68–70 HRC) стали 45 по сравнению с обычными процессами цементации;

2) в результате применения ПСМ для насыщения из диффузионной смеси, состоящей из хромирующей и цементирующей составляющей, легкоплавких элементов, получены диффузионные слои 1300–1500 мкм, имеющие балл зерна 7 и состоящие из перлита с мелкодисперсными включениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Тез. докл. – Минск: БПИ, 1971.
2. Горский В. Г., Адлер Ю. П. Планирование промышленных экспериментов. – М.: Металлургия, 1974.