

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХРОМА В ДИФфуЗИОННОМ СЛОЕ ПРИ ХРОМИРОВАНИИ СТАЛИ 35Х2Н3

Ю.Д. Шабурова¹, JuliaShaburova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8166-7688>

Н.А. Шабурова², shaburovana@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8339-8293>

И.Ю. Пашкеев², pashkeevii@susu.ru

¹ Челябинский металлургический комбинат, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Анализ научной литературы показал, что диффузионное насыщение двух и более элементов поверхности сплавов остается малоизученным из-за сложности пробоподготовки и последующего анализа образцов, и остается актуальной задачей современной науки. Применение новой методики определения концентрации химического элемента при химико-термической обработке сплавов существенно облегчит теоретическое изучение процессов диффузии в сплавах и практическое применение диффузионного насыщения. В статье описана новая методика определения концентрации хрома при диффузионном хромировании стали. Показаны возможности новой методики на примере диффузионного насыщения хромом стали 35Х2Н3. Принцип методики заключается в следующем: полученные образцы после хромирования стали разрезаются поперек продольной оси; из них изготавливаются шлифы; проводится исследование диффузионного слоя с торца образца на растровом электронном микроскопе. Методика анализа, предлагаемая в данной работе, основана на возможностях растровой электронной микроскопии (РЭМ), а именно рентгеноспектрального микроанализа (РСМ) диффузионных слоев поперек сечения (локальное определение химического состава вещества). Контроль элементного состава диффузионного слоя проводили на универсальном сканирующем (растровом) электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV. В ходе работы исследовано распределение хрома в поверхностном слое стали 35Х2Н3. Получен плотный, без пор, поверхностный рабочий слой с содержанием хрома от 100 до 2 %, толщиной до 62 мкм. Определен коэффициент диффузии хрома в α -фазе, который составил $D_{Cr} = 6,3 \cdot 10^{-14}$ м²/с, и в γ -фазе – $D_{Cr} = 3,7 \cdot 10^{-15}$ м²/с. Определена микротвердость хромированного слоя, которая составила в среднем 1369 HV₃₀₀.

Ключевые слова: коэффициент диффузии хрома, распределение хрома в слое, сталь 35Х2Н3, методика исследования

Для цитирования: Шабурова Ю.Д., Шабурова Н.А., Пашкеев И.Ю. Исследование распределения хрома в диффузионном слое при хромировании стали 35Х2Н3 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 1. С. 24–32. DOI: 10.14529/met220103

Original article
DOI: 10.14529/met220103

RESEARCH OF THE CHROMIUM DISTRIBUTION IN THE DIFFUSION LAYER DURING CHROMIUM PLATING OF STEEL X35CRNI2-3

Yu.D. Shaburova¹, JuliaShaburova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8166-7688>

N.A. Shaburova², shaburovana@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8339-8293>

I.Yu. Pashkeev², pashkeevii@susu.ru

¹ Chelyabinsk Iron and Steel Works, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The analysis of scientific literature has shown the diffusion saturation of two and more chemical elements of the surface of alloys remains understudied due to the complexity of sample preparation and subsequent analysis of samples. This remains a relevant objective of modern science. Using of a new technique for determining the concentration of a chemical element during chemical-thermal treatment of

alloys will greatly facilitate the theoretical studying of diffusion processes in alloys and the practical application of diffusion saturation. The article describes a new method of determining the concentration of chromium during diffusion chromium plating of steel. The possibilities of the new technique are shown on the example of diffusion saturation with chromium of X35CRNi2-3. The principle of the technique – the obtained samples after chromium plating of steel are cut across the axis, thin sections are made, the diffusion layer is examined from the end of the sample using an electron microscope. In this work the analysis technique is based on the capabilities of scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis of diffusion layers across a section (local determination of the chemical composition of the material). The chemical composition of the diffusion layer was monitored using a universal scanning electron microscope JEOL JSM-6460 LV. Chromium diffusion saturation of steel X35CRNi2-3 has done. A dense (pore-free) surface layer containing 100 to 2% chromium, to 62 microns thick, has obtained. The diffusion coefficient of chromium has calculated: α -phase – $D_{Cr} = 6.3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, γ -phase – $D_{Cr} = 3.7 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$. The microhardness of the chromium-plated layer has determined, which averaged 1369 HV₃₀₀.

Keywords: diffusion coefficient of chromium, chromium distribution in the layer, steel X35CrNi2-3, research techniques

For citation: Shaburova Yu.D., Shaburova N.A., Pashkeev I.Yu. Research of the chromium distribution in the diffusion layer during chromium plating of steel X35CRNi2-3. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(1): 24–32. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220103

Введение

В начале 40-х годов XX века диффузионное хромирование получило широкое распространение в промышленности, что заложило основы для его дальнейшего детального теоретического и практического изучения. Значительный вклад в разработку теории и практики диффузионного хромирования сплавов в СССР внесли: Г.Н. Дубинин [1–5], А.Н. Минкевич [6–8], М.А. Криштал [9], Л.С. Ляхович [10], Г.В. Земсков, А.П. Гуляев [4, 11, 12] и ряд других [13–19].

Основной методикой исследования концентрации диффундирующего элемента являлось послойное изучение химического состава слоя насыщения [1]. Послойное исследование диффузионно-насыщенных зон стали проводилось путем прецизионного снятия на заданную толщину тонких (до 0,005 мм) поверхностных слоев на специальном шлифовальном станке. Преимущество метода заключается в возможности комплексного исследования диффузионного слоя: послойное изучение химического состава, микроструктуры, микротвердости и проведение рентгеноструктурного послойного фазового анализа образца. Однако для исследования распределения элемента в слое, определения его коэффициента диффузии данная методика обладает существенны-

ми недостатками: сложная пробоподготовка, сложность проведения химического анализа слоя, необходимость использования специального шлифовального оборудования (Г.Н. Дубинин применялся шлифовальный станок для обработки оптических стекол) [1].

1. Материал и методика исследования

Насыщение хромом образцов размерами 10×20×30 мм стали 35X2H3 (химический состав стали приведен в табл. 1) проводилось в порошковой смеси: 47 мас. % хрома (электролитического, ЭХР99,95 ТУ 14-22-174-2002, диаметр частиц не более 150 мкм), 50 мас. % оксида алюминия (плавленный корунд) (размер частиц 0,5–2,0 мкм) и 3 мас. % хлористого аммония (гранулы порошка). Хромирование проводилось при температуре 1000 °С с выдержкой 10 и 24 ч в специальном герметичном контейнере.

Исследование полученных покрытий проводилось на поперечных шлифах. Травление шлифов не проводилось.

Среднюю твердость покрытия определяли на микротвердомере FM-800 по пяти замерам в различных точках поверхности [20].

Исследование состава слоя проводили на электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV с приставкой Oxford Instruments для проведе-

Таблица 1

Химический состав стали 35X2H3, мас. %

Table 1

Chemical composition of steel X35CrNi2-3, wt. %

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
0,33–0,38	1,2–1,7	2,75–3,25	0,5–0,8	0,17–0,37	До 0,03	До 0,035

ния качественного и количественного микроанализа.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1а, 1б представлены изменения содержания основных компонентов (Cr, Ni и Fe) в формирующемся слое в процессе хромирования в течение 10 и 24 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Никель в исследуемых образцах входит в

состав исходной стали, и процентное уменьшение его в слое связано с насыщением стали хромом.

На рис. 1а, 1б хорошо видно, что при увеличении длительности насыщения глубина слоя, обогащенного хромом, возрастает. Количественное содержание элементов в формирующемся слое приведено в табл. 2 для 10 и 24-часовой выдержки при температуре $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

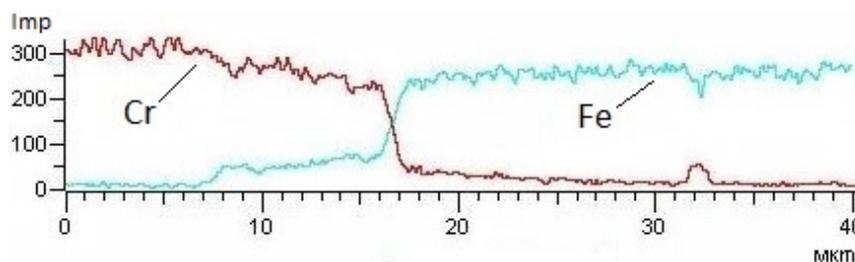


Рис. 1а. Изменение содержания Cr и Fe в слое за 10 ч при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 1a. Change in the content of Cr and Fe in the layer for 10 h at $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

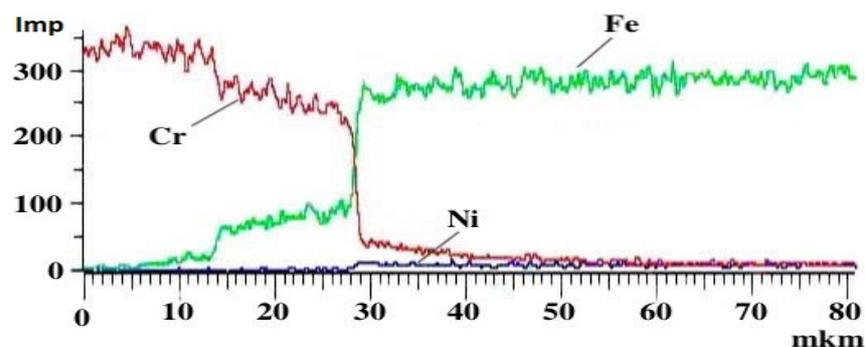


Рис. 1 б. Изменение содержания Cr, Ni, Fe в формирующемся слое при хромировании за 24 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig. 1b. Change in the content of Cr, Ni, Fe in the formed layer during chromium plating for 24 h at $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Количественное содержание элементов в поверхностном слое, мас. %

Таблица 2

Quantitative content of elements in the surface layer, wt. %

Table 2

Спектр	Выдержка 10 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$				Выдержка 24 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	Si	Cr	Fe	Ni	Si	Cr	Fe	Ni
1		95,13	4,87			98,25	1,75	
2		94,9	5,1			96,88	3,12	
3		94	6			93,86	6,14	
4		86,18	13,83			91,71	8,29	
5		78,98	21,02			72,68	27,32	
6		77,48	22,52			67,9	32,1	
7		68,44	31,56			65,6	34,4	
8		62,9	37,1			46,71	51,61	1,68
9	0,5	8,82	86,03	4,47	0,49	6,48	88,95	4,08
10	0,39	6,11	89	4,22	0,58	4,6	91,06	3,76
11	0,33	4,22	91,27	3,95	0,44	3,31	92,19	4,05
12	0,7	3,18	92,19	3,8	0,42	2,35	93,67	3,56

Спектр	Выдержка 10 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$				Выдержка 24 ч при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	Si	Cr	Fe	Ni	Si	Cr	Fe	Ni
13	0,38	2,62	92,41	4,13	0,45	1,91	94,31	3,33
14	0,41	2,4	93,75	3,25	0,54	1,39	94,84	3,23
15	0,51	1,49	94,12	3,49	0,51	1,4	94,49	3,6
16					0,52	1,33	94,98	3,17

На рис. 2а, 2б показаны участки точечного анализа химического состава по направлению от поверхности к основному металлу. Видимая толщина насыщенного хромом слоя составляет 18 и 30 мкм для 10 и 24 ч насыщения соответственно.

Количественное содержание основных элементов в точках анализа химического состава показано в табл. 2. Графики распределения хрома в поверхностном слое исследуемых

образцов показаны на рис. 3. Характер изменения содержания хрома в слоях для 10 и 24 ч выдержки одинаков, разница лишь в толщине слоев.

Согласно данным рис. 3 характер процесса насыщения одинаков, но графики для 10 и 24 ч выдержки сдвинуты относительно друг друга, что показывает изменение глубины диффузионного слоя. Для 24 ч на графике ABCDEF выделены концентрационные участ-

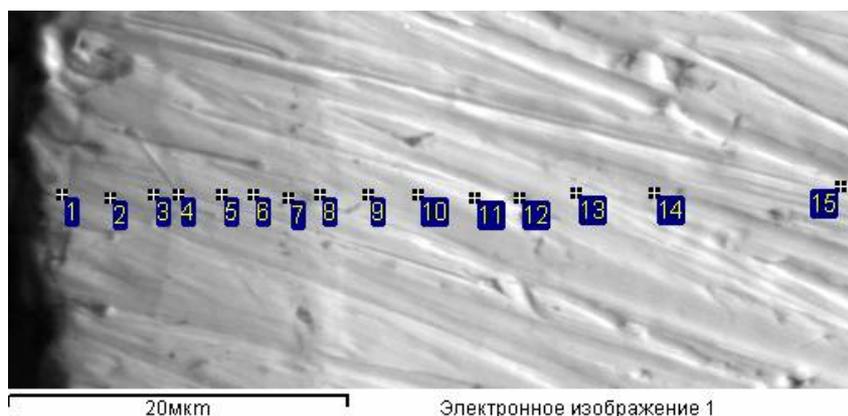


Рис. 2а. Исследование состава поверхности образца ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 10\text{ ч}$).
Номера точек соответствуют номерам спектров в табл. 2
Fig. 2a. Study of the composition of the sample surface ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 10\text{ h}$).
Point numbers correspond to spectrum numbers in Table 2

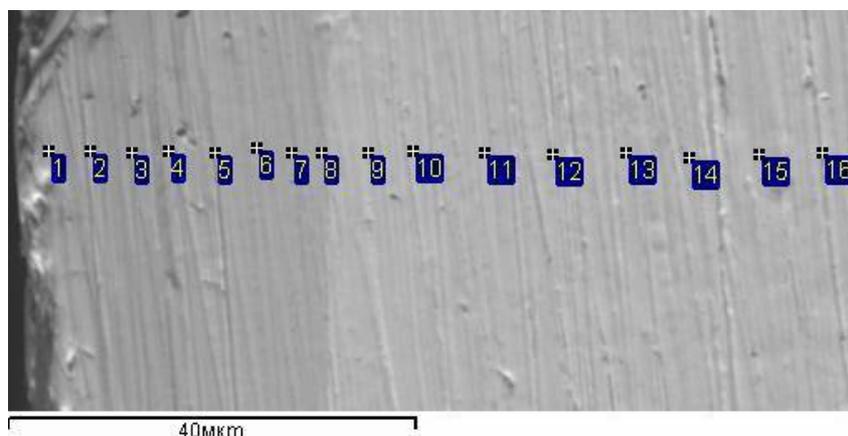


Рис. 2б. Исследование состава поверхности образца ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ ч}$).
Номера точек соответствуют номерам спектров в табл. 2
Fig. 2b. Study of the composition of the sample surface ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 24\text{ h}$).
Point numbers correspond to spectrum numbers in Table 2

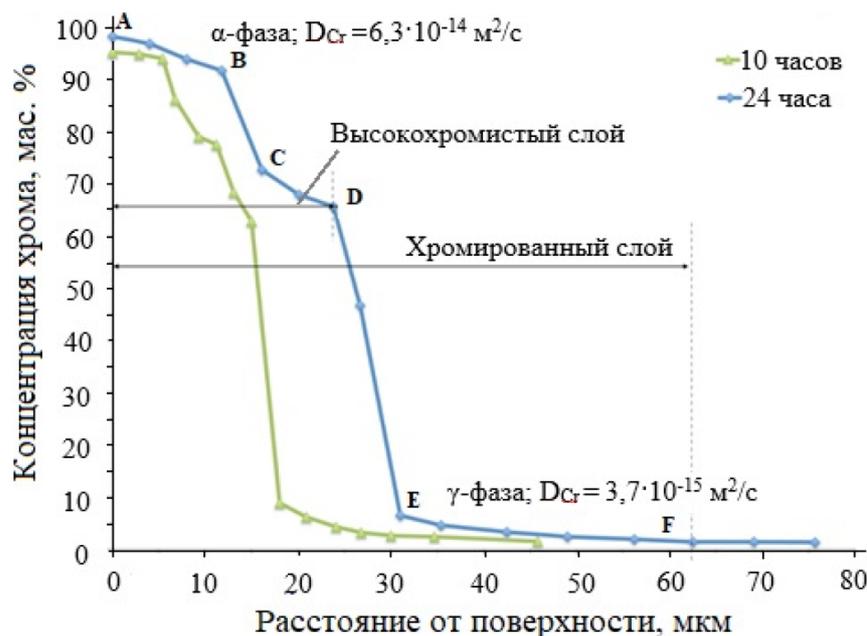


Рис. 3. Распределение хрома в поверхностном слое стали в зависимости от длительности насыщения
Fig. 3. Distribution of chromium in the surface layer of steel depending on the duration of saturation

ки. Отрезок АВ (12 мкм) отражает содержание хрома в слое от 100 до 90 мас. %. Металл имеет кристаллическую решетку ОЦК и α -фазу. Поскольку диффузионный поток непрерывный, и за участком АВ следует CD, а далее EF, то можно считать, что слой АВ сформировался за 24 ч в динамическом режиме при непрерывном потоке атомов хрома через него. Скорость образования слоя – 0,5 мкм/ч. Участок CD (8 мкм) с содержанием хрома 72–65 мас. % следует также отнести к высокохромистому слою FeCr. Участок DE (7 мкм) отражает быстрое снижение концентрации хрома в слое с 65 до 6,5 мас. %. Дальнейшее изменение содержания хрома от точки E до точки F (29 мкм) отражает насыщение γ -железа хромом и заканчивается в точке F при концентрации хрома, равной концентрации в исходной стали. Содержание хрома непрерывно изменяется по всей толщине диффузионного слоя до его концентрации в исходном металле.

Для расчетов параметров диффузии при химико-термической обработке сплавов важное значение имеет время, в течение которого на поверхности сплава достигается равновесная концентрация. Начальная концентрация также зависит от температуры процесса и состава обрабатываемого сплава. Изменение концентрации хрома c_x на глубине x может

быть рассчитано по второму закону Фика, выраженному уравнением

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (1)$$

Если концентрация элемента на поверхности – величина постоянная, из уравнения (1) получаем

$$\frac{c_x}{c_0} = 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

или

$$\frac{c_x}{c_0} = 1 - \Phi(\xi),$$

где c_0 – концентрация диффундирующего элемента на поверхности, мас. %;

c_x – концентрация диффундирующего элемента на глубине x , мас. %;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

t – продолжительность диффузии, с;

$\Phi(\xi)$ – интеграл ошибок (Гауссов интеграл).

Для расчета коэффициента диффузии хрома на участках АВ, CD, EF применена методика, основанная на втором законе Фика. Величину $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ находят из значений $\frac{c_x}{c_0}$ с помощью справочных таблиц (табл. 3) или графиков [21]. Подставляя в отношении $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ значение глубины диффузионного слоя x в метрах, а время выдержки при $T = 1000$ °С t в секундах, вычислили значение коэффициента диффузии D . Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 3

Значения $\frac{c_x}{c_0} = 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}\right)$ для разных значений $\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$ [21]

Table 3

Values of $\frac{c_x}{c_0} = 1 - \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}\right)$ for different values of $\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$ [21]

$\frac{c}{c_0}$	$\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$	$\frac{c}{c_0}$	$\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$	$\frac{c}{c_0}$	$\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}$
1,00	0,000	0,30	0,733	0,016	1,70
0,90	0,090	0,28	0,764	0,012	1,78
0,85	0,135	0,26	0,796	0,010	1,82
0,80	0,179	0,24	0,831	0,008	1,88
0,75	0,235	0,22	0,967	0,006	1,94
0,70	0,272	0,20	0,906	0,005	1,99
0,65	0,321	0,18	0,948	0,004	2,04
0,60	0,371	0,16	0,994	0,003	2,10
0,55	0,423	0,14	1,044	0,002	2,19
0,50	0,477	0,12	1,099	0,0016	2,23
0,48	0,500	0,10	1,16	0,0012	2,29
0,46	0,522	0,09	1,20	0,0010	2,33
0,44	0,546	0,08	1,24	0,0008	2,37
0,42	0,570	0,07	1,28	0,0006	2,43
0,40	0,595	0,06	1,33	0,0005	2,46
0,38	0,621	0,05	1,39	0,0004	2,51
0,36	0,647	0,04	1,45	0,0003	2,56
0,34	0,675	0,03	1,53	0,0002	2,63
0,32	0,703	0,02	1,65	0,0001	2,75

Таблица 4

Коэффициент диффузии хрома

Table 4

Chromium diffusion coefficient

Участок	$D_{Cr}, \text{m}^2/\text{c}$
AB	$6,3 \cdot 10^{-14}$
CD	$1,6 \cdot 10^{-14}$
EF	$3,7 \cdot 10^{-15}$

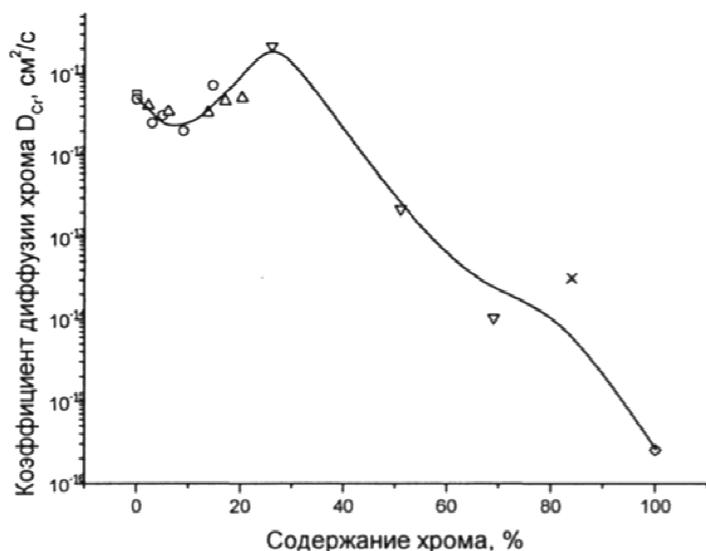


Рис. 4. Влияние концентрации на коэффициент диффузии хрома в сплавах с железом при $T = 1073 \text{ K}$ по данным различных авторов [22]

Fig. 4. Influence of concentration on the diffusion coefficient of chromium in alloys with iron at $T = 1073 \text{ K}$ according to various authors [22]

Таблица 5

Микротвердость образцов, HV₃₀₀

Table 5

Microhardness of samples, HV₃₀₀

№	Исходный образец	Хромированное покрытие образца после 10 ч выдержки	Хромированное покрытие образца после 24 ч выдержки
1	558	1334	1432
2	653	1395	1014
3	484	1270	962
4	518	1347	1972
5	540	1448	1465
Среднее	551	1359	1369

Экспериментальные данные работы [22] для коэффициента диффузии хрома D_{Cr} представлены на рис. 4. Из графика следует, что вначале наблюдается снижение коэффициента диффузии до минимума с последующим возрастанием до максимума значений в районе 25 ат. %, а затем непрерывное снижение значения D_{Cr} .

Согласно нашим экспериментальным данным, коэффициент диффузии хрома непрерывно возрастает с увеличением концентрации хрома в диффузионном слое, и в отличие от данных [22] падение коэффициента диффузии у поверхности не наблюдается.

Следует учитывать, что данные, используемые авторами статьи [22], взяты для различных сталей, отличаются методиками насыщения, обработкой данных и являются сравнением неравноточных измерений.

Средняя твердость слоя после 10 ч выдержки составила 1359 HV₃₀₀, а после 24 часов выдержки – 1369 HV₃₀₀ (табл. 5).

Заключение

Результаты исследования показали, что в ходе диффузионного насыщения хромоникелевой стали хромом был сформирован поверхностный рабочий слой, плотный без пор, с содержанием хрома от 100 до 2 %, толщиной до 62 мкм. Содержание хрома в диффузионном слое неоднородно, наблюдается высокохромистый слой 24 мкм, с содержанием от 98 до 65 % Cr. Как показало исследование, время выдержки не влияет на характер распределения хрома в стали 35X2H3, изменяется только толщина диффузионного слоя.

Микротвердость хромированного слоя составила в среднем 1369 HV₃₀₀, что в 2,5 раза превышает твердость основного металла.

Коэффициент диффузии в α -фазе составил $D_{Cr} = 6,3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$, в γ -фазе – $D_{Cr} = 3,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$.

Список литературы

1. Дубинин Г.Н., Корицкий В.Г., Веселовский И.М. Диффузия хрома, ванадия и марганца в поверхностные слои стали из газовой среды // Журнал технической физики. 1953. Т. 23, вып. 10. С. 1751–1760.
2. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов. М.: Машиностроение, 1964. 450 с.
3. Дубинин Г.Н. Хромирование стали. М.: Metallurgizdat, 1950. – 58 с.
4. Гуляев А.П., Дубинин Г.Н. Хромирование стали в газовой среде // Вестник машиностроения. 1945. № 5. С. 5–10.
5. Прогрессивные методы химико-термической обработки / под. ред. Г.Н. Дубинина, Я.Д. Когана. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
6. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1965. 493 с.
7. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1950. 433 с.
8. Минкевич А.Н., Борздыка А.М. Химико-термические методы повышения жаростойкости и кислотоупорности стали. М.: Тип. им. Воровского, 1944. 44 с. (Госплан СССР. Институт технико-экономической информации. № 11).
9. Криштал М.А. Диффузионные процессы в железных сплавах. М.: Metallurgizdat, 1963. 278 с.

10. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич, Э.Д. Щербаков. Минск: Наука и техника, 1974. 288 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. 5-е изд., перераб. М.: Металлургия, 1977. 647 с.
12. Гуляев А.П. Термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1960. 496 с.
13. Попов А.А. Теоретические основы химико-термической обработки стали. Свердловск: Metallurgizdat, 1962. 120 с.
14. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
15. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справ. / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин и др. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
16. Процессы взаимной диффузии в сплавах / И.Б. Боровский, К.П. Гуков, И.Д. Марчукова, Ю.Э. Угасте. М.: Наука, 1973. 360 с.
17. Шиняев А.Я. Диффузионные процессы в сплавах. М.: Наука, 1975. 228 с.
18. Архаров В.И. Газовое хромирование. Свердловск: Изд-во Урал. филиала Акад. наук СССР, 1945. 76 с. (Труды Института металлофизики и металлургии. Вып. 4).
19. Горбунов Н.С. Диффузионные покрытия на железе и стали. М.: Академиздат, 1958. 206 с.
20. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
21. Физическое металловедение / Я.С. Уманский, Б.Н. Финкельштейн, М.Е. Блантер и др. М.: Metallurgizdat, 1955. 724 с.
22. Коэффициент диффузии хрома и ближний порядок в сплавах Fe–Cr / Д.А. Мирзаев, А.А. Мирзоев, К.Ю. Окишев, А.С. Созыкина // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2009. Вып. 12, № 14. С. 49–52.

References

1. Dubinin G.N., Koritskiy V.G., Veselovskiy I.M. [Diffusion of chromium, vanadium and manganese into the surface layers of steel from a gas medium]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1953;23(10): 1751–1760. (In Russ.)
2. Dubinin G.N. *Diffuzionnoye khromirovaniye splavov* [Diffusion chromium plating of alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1964. 450 p. (In Russ.)
3. Dubinin, G.N. *Khromirovaniye stali* [Chrome plating steel]. Moscow: Metallurgizdat; 1950. 58 p. (In Russ.)
4. Gulyayev A.P., Dubinin G.N. [Chrome plating of steel in a gas environment]. *Vestnik mashinostroyeniya*. 1945;(5): 5–10. (In Russ.)
5. Dubinin G.N., Kogan Ya.D., editors. *Progressivnye metody khimiko-termicheskoy obrabotki* [Progressive methods of chemical-thermal treatment]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1979. 184 p. (In Russ.)
6. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1965. 493 p. (In Russ.)
7. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka stali* [Chemical-thermal treatment of steel]. Moscow: Mashgiz; 1950. 433 p. (In Russ.)
8. Minkevich A.N., Borzdyka A.M. *Khimiko-termicheskiye metody povysheniya zharostoykosti i kislotoupornosti stali* [Chemical-thermal methods for increasing the heat resistance and acid resistance of steel]. *Gosplan SSSR. Institut tekhniko-ekonomicheskoy informatsii. No. 11*. Moscow: Tip. im. Vorovskogo; 1944. 44 p. (In Russ.)
9. Krishtal M.A. *Diffuzionnyye protsessy v zheleznykh splavakh* [Diffusion processes in iron alloys]. Moscow: Metallurgizdat; 1963. 278 p. (In Russ.)
10. Lyakhovich L.S., Voroshnin L.G., Panich G.G., Shcherbakov E.D. *Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytiya* [Multi-component diffusion coatings]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1974. 288 p. (In Russ.)
11. Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Metal science]. 5th ed. Moscow: Metallurgiya; 1977. 647 p. (In Russ.)
12. Gulyayev A.P. *Termicheskaya obrabotka stali* [Heat treatment of steel]. Moscow: Mashgiz; 1960. 496 p. (In Russ.)
13. Попов А.А. *Teoreticheskiye osnovy khimiko-termicheskoy obrabotki stali* [Theoretical foundations of chemical-thermal treatment of steel]. Sverdlovsk: Metallurgizdat; 1962. 120 p. (In Russ.)

14. Lakhtin Yu.M. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya; 1983. 360 p. (In Russ.)
15. Borisenok G.V., Vasil'yev L.A., Voroshnin L.G. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov: sprav.* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys: a reference book]. Moscow: Metallurgiya; 1981. 424 p. (In Russ.)
16. Borovskiy I.B., Gurov K.P., Marchukova I.D., Ugaste Yu.E. *Protsessy vzaimnoy diffuzii v splavakh* [Interdiffusion processes in alloys]. Moscow: Nauka; 1973. 360 p. (In Russ.)
17. Shinyayev A.Ya. *Diffuzionnye protsessy v splavakh* [Diffusion processes in alloys]. Moscow: Nauka; 1975. 228 p. (In Russ.)
18. Arkharov V.I. *Gazovoye khromirovaniye* [Gas chromium plating]. *Trudy Instituta metallofiziki i metallurgii. Iss. 4.* Sverdlovsk: Ural branch of Acad. sciences of the USSR Publ., 1945. 76 p. (In Russ.)
19. Gorbunov N.S. *Diffuzionnye pokrytiya na zheleze i stali* [Diffusion coatings on iron and steel]. Moscow: Akademizdat; 1958. 206 p. (In Russ.)
20. Grigorovich V.K. *Tverdost' i mikrotverdost' metallov* [Hardness and microhardness of metals]. Moscow: Nauka; 1976. 230 p. (In Russ.)
21. Umanskiy Ya.S., Finkel'shteyn B.N., Blanter M.E. et al. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical Metal Science]. Moscow: Metallurgizdat; 1955. 724 p. (In Russ.)
22. Mirzaev D.A., Mirzoev A.A., Okishev K.Yu., Sozykina A.S. Diffusion coefficient of chromium and short-range ordering in Fe–Cr alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2009;12(14):49–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Шабурова Юлия Дмитриевна, начальник участка исследовательско-технологического отдела, Челябинский металлургический комбинат, Челябинск, Россия; JuliaShaburova@mail.ru.

Шабурова Наталия Александровна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shaburovana@susu.ru.

Пашкеев Игорь Юльевич, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pashkeevii@susu.ru.

Information about the authors

Yuliya D. Shaburova, Section chief of the Research-Technological Department, Chelyabinsk Iron and Steel Works, Chelyabinsk, Russia; JuliaShaburova@mail.ru.

Nataliya A. Shaburova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shaburovana@susu.ru.

Igor Yu. Pashkeev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Senior Researcher, Department of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pashkeevii@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 13.12.2021

The article was submitted 13.12.2021