

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХРОМА И ВАНАДИЯ В ДИФфуЗИОННОМ СЛОЕ СТАЛИ 35Х2Н3 ПРИ СОВМЕСТНОМ ТЕРМОДИФфуЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ

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. Термодиффузионное насыщение поверхности сплавов двумя и более элементами остается малоизученным несмотря на большой практический и научный интерес, который представляет подобный метод химико-термической обработки. Одновременное введение нескольких элементов позволяет значительно сократить продолжительность обработки изделий и получить на поверхности изделия многофазный состав, что открывает широкие возможности для придания изделиям уникальных технологических и эксплуатационных свойств. В статье описаны особенности распределения хрома и ванадия при совместном термодиффузионном насыщении стали 35Х2Н3 при температуре 1000 °С. Предлагаемая методика анализа основана на возможностях рентгеноспектрального микроанализа (РСМ) диффузионных слоев на поперечных микрошлифах полученных образцов. Контроль элементного состава диффузионного слоя проводили на универсальном сканирующем (растровом) электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV. Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом металлографическом микроскопе Axio Observer D1.m. Рентгенофазовый анализ проводился на диффрактометре Rigaku Ultima IV. Измерение твердости проводилось на микротвердометре FM-800 при нагрузке 100 г. Получены данные о качественном и количественном распределении хрома и ванадия в поверхностном слое стали. Показано, что формирующееся диффузионное покрытие имеет следующее строение: бесструктурный внешний слой, состоящий преимущественно из карбидов и нитридов хрома и ванадия, → область столбчатых кристаллов (испытывающая $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при охлаждении), состоящая преимущественно из твердого раствора $Cr_{1,0}V_{0,4}Fe_{0,3}$, → частично обезуглероженная α -фаза → основной металл. Определены коэффициенты диффузии хрома и ванадия: в α -фазе $D_{Cr} = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_V = 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$; в γ -фазе $D_{Cr} = 1,13 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_V = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$. Микротвердость внешнего поверхностного слоя составила 1400–1980 Н, диффузионного слоя в основном металле – 630–790 НВ, основного металла – порядка 540–510 НВ.

Ключевые слова: термодиффузионное хромирование, коэффициенты диффузии хрома и ванадия, строение диффузионного слоя, методика анализа

Для цитирования: Шабурова Ю.Д., Шабурова Н.А., Пашкеев И.Ю. Распределение хрома и ванадия в диффузионном слое стали 35Х2Н3 при совместном термодиффузионном насыщении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 1. С. 13–23. DOI: 10.14529/met220102

THE CHROMIUM AND VANADIUM DISTRIBUTION IN THE DIFFUSION LAYER OF STEEL X35CRNI2-3 DURING THERMODIFFUSION SATURATION

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. Termodiffusion saturation of the surface of alloys with two or more elements remains poorly understood despite the great practical and scientific interest that this method of chemical-thermal treatment represents. The simultaneous introduction of several elements can significantly reduce the processing time of products and obtain a multiphase composition on the surface of the product, which opens up wide opportunities for imparting unique technological and operational properties to products. The article describes the features of the distribution of chromium and vanadium during joint thermal diffusion saturation of steel X35CrNi2-3 at a temperature of 1000 °C. The proposed analysis technique is based on the possibilities of X-ray spectral microanalysis of diffusion layers on transverse microsections of the obtained samples. The elemental composition of the diffusion layer was monitored using a JEOL JSM-6460 LV universal scanning electron microscope. The microstructure was studied on an optical metallographic microscope Axio Observer D1.m. X-ray phase analysis was carried out on a Rigaku Ultima IV diffractometer. The hardness measurement was carried out on an FM-800 microhardness tester at a load of 100 g. Data were obtained on the qualitative and quantitative distribution of chromium and vanadium in the surface layer of steel. It is shown that the emerging diffusion coating has the following structure: a structureless outer layer, consisting mainly of chromium, vanadium carbides → a region of columnar crystals (experiencing $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation upon cooling), consisting mainly of their $\text{Cr}_{1.0}\text{V}_{0.4}\text{Fe}_{0.3}$ solid solution → partially decarburized α -phase → base metal. The diffusion coefficients of chromium and vanadium are determined: in the α -phase $D_{\text{Cr}} = 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$; $D_{\text{V}} = 1.8 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$; in the γ -phase $D_{\text{Cr}} = 1.13 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$; $D_{\text{V}} = 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$. The microhardness of the outer surface layer was 1400–1980 H, the diffusion layer in the base metal was 630–790 HV, and the base metal was about 540–510 HV.

Keywords: thermal diffusion chromium plating, diffusion coefficients of chromium and vanadium, diffusion layer structure, analysis technique

For citation: Shaburova Yu.D., Shaburova N.A., Pashkeev I.Yu. The chromium and vanadium distribution in the diffusion layer of steel X35CRNI2-3 during termodiffusion saturation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2022;22(1):13–23. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220102

Введение

Существующие способы химико-термической обработки и диффузионной металлизации, в частности, предполагают насыщение поверхности обрабатываемого металла преимущественно одним элементом. Однако на примере хромирования было показано [1], что наряду с повышением твердости, износостойкости и коррозионной стойкости поверхностного слоя такая обработка приводит к формированию у поверхности низкоуглеродистого слоя (зачастую чисто ферритного) с низкой твердостью. Поэтому в промышленности зачастую используют комплексное насыщение. Для повышения ударо- и износостойкости деталей из штамповых сталей, работающих в условиях ударных нагрузок, рекомендуют применять

последовательное насыщение стали углеродом и хромом [2–6]. Другие авторы рекомендуют использовать борхроммирование [7, 8]. Также при хромировании используется насыщение и другими элементами – алюминием, никелем, кремнием, вольфрамом, ванадием, др. [9–12]. Сложные сплавы, образующиеся при комплексном диффузионном насыщении на поверхности изделий, открывают широкие возможности для придания изделиям самых различных технологических и эксплуатационных свойств [13–15].

С точки зрения практики комплексного насыщения интерес представляют хромованадиевые покрытия. Известно, что благодаря большой твердости карбидного слоя ванадиеванная сталь обладает высокой износостой-

костью, во много раз большей, чем закаленная сталь и даже сталь, подвергнутая диффузионному хромированию. Однако как сами ванадиевые покрытия, так и комплексные ванадиевые покрытия с хромом, молибденом, вольфрамом изучены мало [1, 12].

В работе приводятся результаты экспериментов по совместному насыщению поверхности конструкционной стали ванадием и хромом. Проводится анализ строения сформировавшихся диффузионных слоев и их механических характеристик.

1. Материал и методика исследования

Совместное насыщение хромом и ванадием образцов стали 35X2H3 размером 10×20×30 мм проводилось в порошковой смеси: 42 мас. % электролитического рафинированного хрома ЭРХ-1 (диаметр частиц не более 150 мкм), 5 мас. % феррованадия (диаметр частиц не более 150 мкм), 50 мас. % оксида алюминия (плавный корунд) (размер частиц 0,5–2,0 мм) и 3 мас. % хлористого аммония. Химический состав стали и компонентов насыщающей смеси приведен в табл. 1, 2.

Компоненты насыщающей смеси перед использованием тщательно перемешивались в шаровой мельнице и загружались в металлический контейнер. Туда же помещались исследуемые стальные образцы и утрамбовывались. Затем контейнер герметизировался и устанавливался в камерную печь. Насыщение проводилось при температуре 1000 °С в течение 24 ч. Отсчет времени выдержки начинается с момента достижения в рабочем пространстве печи заданной температуры насыщения. По окончании времени выдержки печь отключалась и контейнер охлаждался вместе с

печью. Детали находились в контейнере до полного его охлаждения до комнатной температуры.

Для исследования структуры и свойств покрытий изготавливались поперечные шлифы. Дополнительно проводилась сошлифовка поверхности на глубину покрытия 10 и 30 мкм (продольные шлифы).

Исследование состава слоя проводили на электронном микроскопе JEOL JSM-6460 LV, оснащенный приставкой Oxford Instruments для проведения качественного и количественного микроанализа.

Исследование микроструктуры проводилось на оптическом металлографическом микроскопе Axio Observer D1.m. Травление микрошлифов – в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Rigaku Ultima IV в альфа-излучении железного анода.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере FM-800 при нагрузке 100 г.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана микроструктура образца на поперечном шлифе. Видно, что вблизи поверхности насыщения имеется внешнее покрытие с четкой границей раздела с подложкой. Участок внешнего покрытия толщиной порядка 15–20 мкм, примыкающий к подложке, имеет столбчатое строение. Верхняя же часть его бесструктурная, частично скалывается при шлифовке и поэтому имеет неравномерную толщину от 5 до 40 мкм. Под внешним покрытием отчетливо видна слабо-травящаяся область основного металла толщиной 15–20 мкм, распространяющаяся и по

Химический состав стали 35X2H3, мас. %

Таблица 1

Chemical composition of steel X35CrNi2-3, wt. %

Table 1

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

Химический состав компонентов смеси, мас. %

Таблица 2

Chemical composition of the components of the mixture, wt. %

Table 2

Компонент смеси	Al	Si	V	Cr	Mn	Fe	C
Хром ЭРХ-1*	0,006	0,01	–	99,95	–	0,008	0,008
Феррованадий	2,68	1,57	80,63	0,95	1,22	12,95	0,1

* Дополнительно примеси, мас. %: O – 0,005; N – 0,005; S – 0,002; Ni – 0,005; Cu – 0,003.

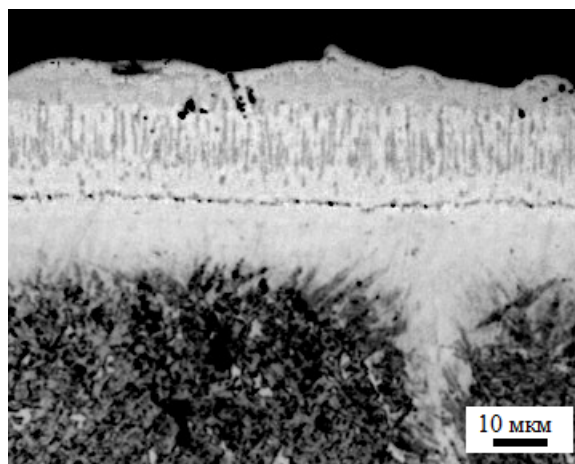


Рис. 1. Микроструктура диффузионного покрытия после травления
Fig. 1. Microstructure of the diffusion coating after etching

границам первичных аустенитных зерен. Преимущественную диффузию элементов по границам зерен при хромировании отмечают и в работе [4]. Слабый эффект травления этой области объясняется повышенным (по сравнению с основным металлом) содержанием в ней хрома, что делает ее нетравящейся в используемом реактиве.

Анализ строения диффузионного покрытия показывает, что процесс диффузии протекал согласно традиционным представлениям [1–5] – путем адсорбции на поверхности детали атомов хрома и ванадия и формирования на их основе слоя с постоянно высокой концентрацией этих компонентов. Дальнейшее формирование диффузионного слоя происходит за счет адсорбции атомов хрома, ванадия и железа из газовой насыщающей фазы на поверхность насыщаемого металла. Ввиду того, что железо, ванадий и хром образуют друг с другом неограниченные твердые растворы [16, 17], следует ожидать, что внешний поверхностный слой покрытия будет состоять из неограниченного твердого раствора переменной концентрации. Ввиду наличия в газовой насыщающей фазе, сформировавшейся в герметичном контейнере при нагреве до 1000 °С, атомарного углерода и большим сродством

хрома и ванадия к этому элементу следует ожидать и наличие в покрытии карбидов этих элементов.

Результаты химического анализа покрытия на наружной поверхности и на глубинах 10 и 30 мкм от наружной поверхности образца (т. е. на глубину бесструктурного внешнего слоя и слоя столбчатых кристаллов, соответственно) приведен в табл. 3. Можно отметить, что на глубине 10 мкм поверхность шлифа рыхлая. На глубине 30 мкм поверхность плотная, легко полирующаяся. Согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа (см. табл. 3) на глубине 10 мкм внешнее покрытие содержит более 80 % хрома и 8 и 9 % железа и ванадия соответственно. На большей же глубине содержание хрома снижается в два раза, содержание ванадия увеличивается в четыре раза, железа в два.

На рис. 2 показаны результаты рентгенофазового анализа образцов, которые показывают, что в обоих случаях структура многофазная. На глубине 10 мкм в структуре преобладает карбид хрома и ванадия. На этой глубине отмечено также наличие трехкомпонентного твердого раствора $Cr_{1,0}V_{0,4}Fe_{0,3}$. А на глубине 30 мкм преобладает твердый раствор замещения $Cr_{1,0}V_{0,4}Fe_{0,3}$ с ОЦК решёткой, судя

Результаты химического анализа, мас. %

Таблица 3

Results of chemical analysis, wt. %

Table 3

Участок анализа	V	Cr	Fe	Итог
Наружная поверхность	7,26	88,45	4,29	100,00
Покрытие на глубине 10 мкм	9,26	82,60	8,14	100,00
Покрытие на глубине 30 мкм	40,88	42,25	16,87	100,00

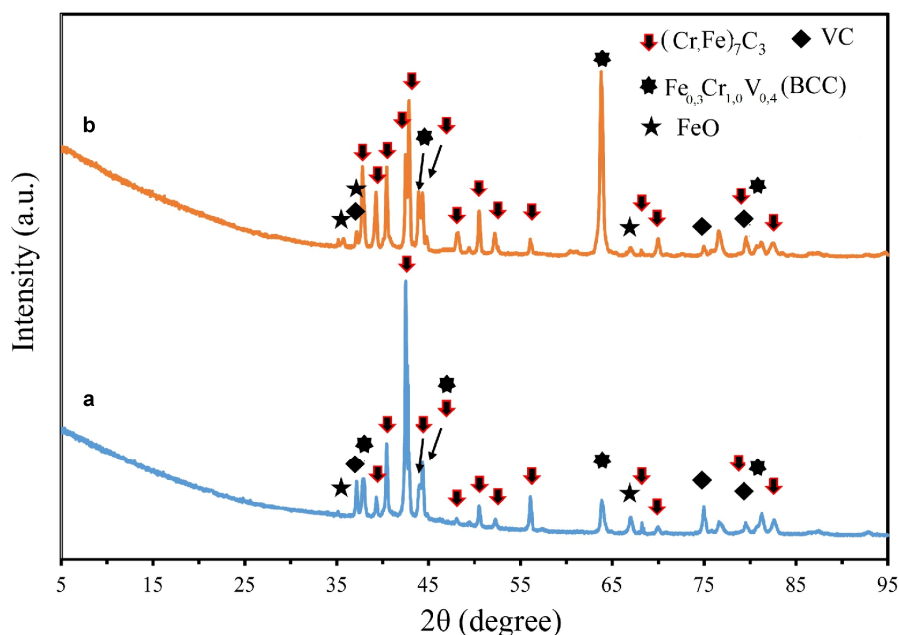


Рис. 2. Рентгенограмма поверхности образца: а – на глубине 10 мкм; б – на глубине 30 мкм
Fig. 2. X-ray pattern of the sample surface: a – at a depth of 10 μm; b – at a depth of 30 μm

по интенсивности пиков карбидов количество их заметно ниже. Присутствие в покрытии карбидов хрома и ванадия можно объяснить присутствием углерода в насыщающем порошке, а также диффузией углерода из поверхностных слоев насыщаемого металла.

В литературе информация о результатах рентгенофазового анализа на различных глубинах хромированных диффузионных покрытий отсутствует, однако результаты работы [18] согласуются с нашими. Авторы этой работы обнаружили на наружной поверхности образцов при совместном насыщении хромом и ванадием карбиды хрома $(Cr, Fe)_7C_3$ и ванадия VC. Соответственно, с учетом полученных результатов можно предположить, что состав фаз в покрытии меняется от карбидных на наружной поверхности до твердого раствора замещения вблизи основного металла. В самом слое наблюдается различное соотношение этих фаз.

На рис. 3 показан поверхностный диффузионный слой при увеличении 4000 крат и результаты точечного химического анализа. Видно, что по всей толщине внешнее покрытие представляет собой твердый раствор трех основных компонентов – железа, хрома и ванадия. Причем содержание этих элементов изменяется нелинейно: содержание ванадия имеет максимальные значения в области столбчатых кристаллов, содержание хрома практически монотонно снижается от поверх-

ности к основному металлу. Наиболее монотонно изменение содержания железа (см. рис. 3). Учитывая, что хром и ванадий образуют ряд непрерывных твердых растворов друг с другом [16–17] и тот факт, что общее содержание ванадия в насыщающей смеси не превышает 4 мас. %, в процессе формирования внешнего слоя решающую роль будет играть взаимодействие железа и хрома. Согласно диаграмме состояния «железо – хром», при температуре насыщения 1000 °C эти элементы образуют непрерывный ряд α твердого раствора с содержанием хрома от 100 до 12,5 мас. % и твердого раствора на основе γ -фазы с содержанием хрома 0 до 12,5 мас. % [17]. При снижении температуры металла до 830 °C происходит полиморфное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение и формирование негомогенного α -твердого раствора. Именно этим можно объяснить химическую неоднородность области столбчатых кристаллов (спектры 2–6, см. рис. 3 и табл. 4).

На рис. 4 показаны EDX карты распределения элементов в поверхностном слое. Видно, что вблизи основного металла наблюдается сплошной участок с максимальной концентрацией ванадия, в области столбчатых кристаллов концентрация ванадия заметно ниже.

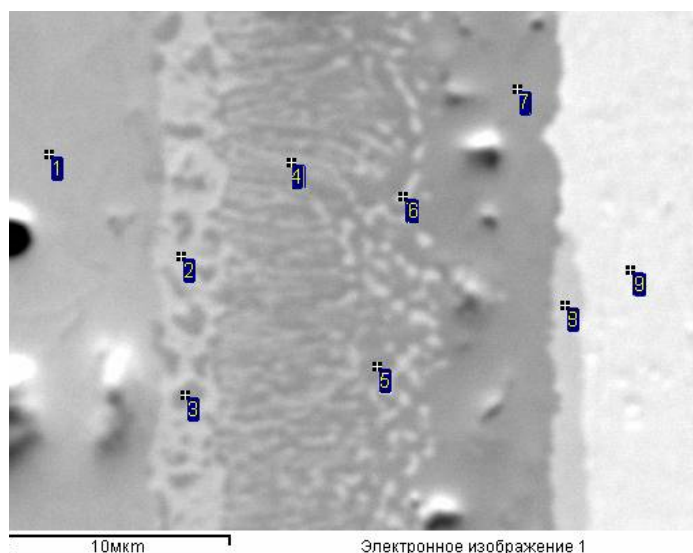
Для установления количественного характера распределения элементов насыщения в поверхностном слое исследуемых образцов было проведено сканирование химического

состава диффузионного покрытия на поперечных шлифах с шагом 4 мкм вдоль линии в направлении перпендикулярной поверхности образца (рис. 5). Результаты точечного анализа химического состава показаны в табл. 5. На рис. 6 показан график распределения хрома и ванадия по толщине диффузионного слоя.

Используя полученные данные, можно проанализировать процесс совместного насыщения поверхности стали хромом и ванадием. Ориентируясь на данные табл. 5, можно отметить, что до точки 6 наблюдается внешнее покрытие, от точки 6 – основной насыщаемый металл. Фрагмент АВ (глубина 3 мкм) в зависимости от распределения хрома по глубине слоя отражает содержание хрома в слое от 80 до 30 мас. %. На участке ВС (глубина 3–18 мкм и область столбчатых кристал-

лов соответственно) содержание хрома меняется мало. От точки С (порядка 4 мкм от поверхности основного металла) и дальше наблюдается плавное снижение содержания хрома вплоть до его содержания в стали (точка F). Содержание ванадия, как и показывали результаты предварительного анализа (см. рис. 3 и EDX карты рис. 4), изменяется по линии с экстремумом в области столбчатых кристаллов. Как видно из рис. 6, содержание ванадия плавно снижается на участке С'F' с максимальных 58 до 0,3 мас. %. В итоге глубина диффузионного слоя ванадия в основном металле составляет порядка 25 мкм, а хрома – порядка 16 мкм.

Учитывая, что при температуре насыщения основной металл образца стали однофазный – аустенитная γ -фаза, а во внешнем слое,



**Рис. 3. Микроструктура диффузионного покрытия, $\times 4000$.
 Химический состав точек указан в табл. 4
 Fig. 3. Microstructure of the diffusion coating, $\times 4000$.
 The chemical composition of the dots is shown in Table 4**

Результаты химического анализа образца в точках, указанных на рис. 3, мас. %

Таблица 4

Sample chemical analysis results at the points shown in Fig. 3, wt. %

Table 4

№ спектра	V	Cr	Fe	Ni
1	5,48	89,18	5,34	
2	11,52	67,99	20,49	
3	25,79	61,51	12,71	
4	59,86	29,81	10,34	
5	70,00	21,72	8,27	
6	66,73	23,40	9,87	
7	90,64	8,07	1,28	
8	27,76	39,28	32,96	
9	1,41	5,73	89,37	3,49

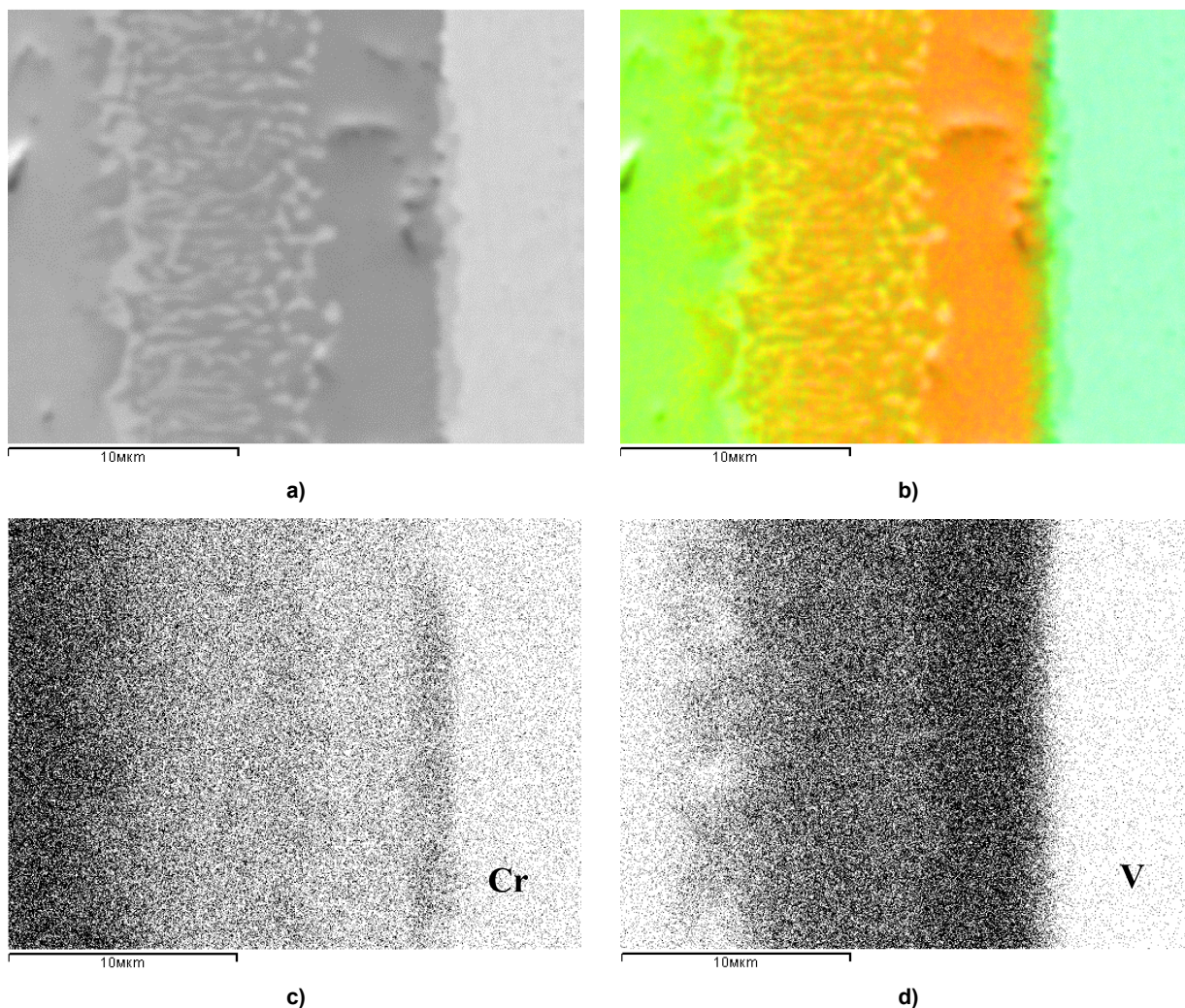


Рис. 4. Участок анализа (а, b) и карты распределения элементов: с – хрома (желтый на рис. 4b);
d – ванадия (оранжевый на рис. 4b) в диффузионном покрытии
Fig. 4. Analysis section (a, b) and EDS-maps of the elements distribution: c – chromium (yellow in Fig 4b);
d – vanadium (orange in Fig. 4b) in a diffusion coating

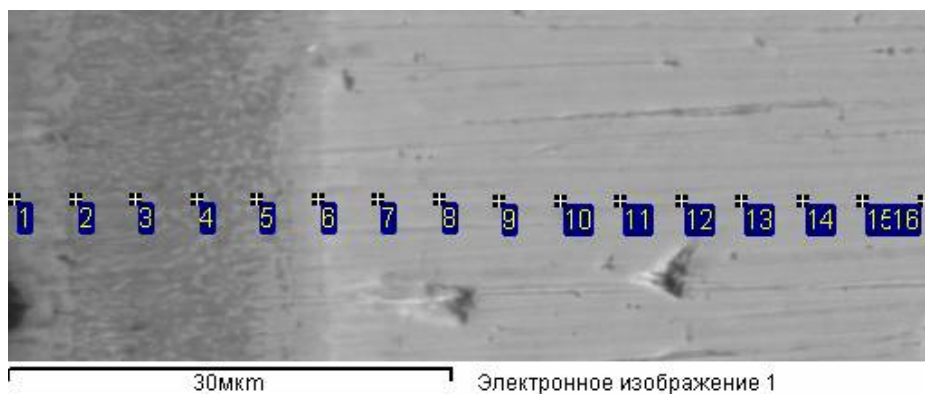


Рис. 5. Точки анализа химического состава в диффузионном слое
Fig. 5. Points of analysis of the chemical composition in the diffusion layer

Таблица 5

Количественное содержание элементов в поверхностном слое, мас. %

Table 5

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

Спектр	Si	V	Cr	Fe	Ni
1			12,12	79,18	8,7
2			52,85	35,36	11,78
3			57,69	29,66	12,66
4			58,02	28,26	13,72
5			58,06	27,55	14,39
6	0,48	3,42	16	76,7	3,4
7	0,69	0,86	5,13	89,42	3,9
8	0,42	0,57	3,34	92,48	3,19
9	0,59	0,37	2,09	93,74	3,22
10	0,57	0,34	2,01	93,83	3,25
11	0,49	0,39	1,38	94,22	3,51
12	0,48	0,24	1,4	94,85	3,03
13	0,68		1,57	94,1	3,65
14	0,55		1,39	94,58	3,48
15	0,57		1,46	94,62	3,35
16	0,56		1,22	94,74	3,48

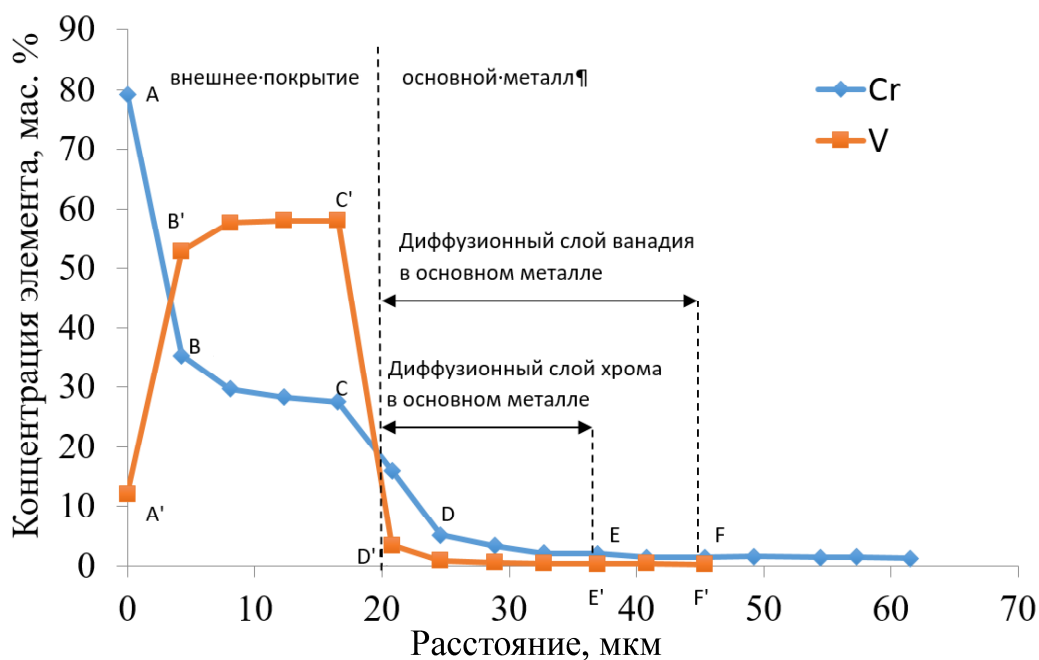


Рис. 6. Распределение хрома и ванадия в поверхности стали
Fig. 6. Distribution of chromium and vanadium in the steel surface

как было показано выше, присутствуют как γ , так и α -фазы, то представляло интерес оценить диффузионную способность ванадия и хрома в этих фазах. Для расчета коэффициента диффузии хрома и ванадия применена методика, основанная на втором законе Фика [19]. Результаты расчета представлены в табл. 6. Видно, что коэффициент диффузии хрома в обеих фазах примерно одинаковый,

поэтому и распределение хрома в слое достаточно равномерно. Диффузионная же способность ванадия в альфа-фазе на порядок выше, чем в гамма-фазе. Благодаря этому при температуре насыщения атомам ванадия обеспечивается ускоренное прохождение через внешний поверхностный слой со структурой альфа-фазы и торможение в области слоя со структурой гамма-фазы. В результате

Таблица 6

Результаты расчета коэффициентов диффузии хрома и ванадия в α и γ фазах

Table 6

Results of calculation of the diffusion coefficients of chromium and vanadium in the α and γ phases

	$D_V, \text{ м}^2/\text{с}$	$D_{Cr}, \text{ м}^2/\text{с}$
α -фаза	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$
γ -фаза	$1,3 \cdot 10^{-15}$	$1,13 \cdot 10^{-15}$

Бесструктурное внешнее покрытие 1400–1450 HV		Столбчатые кристаллы 1980–1600 HV		α -фаза о.м. 790–630 HV		Основной металл (о.м.) 540–510 HV
---	--	--------------------------------------	--	-----------------------------------	--	--------------------------------------



Рис. 7. Схема термодиффузионного покрытия
Fig. 7. Scheme of thermal diffusion coating

во внешнем поверхностном слое наблюдается пик содержания ванадия вблизи основного металла. Аналогичный экстремум в распределении ванадия при совместном насыщении стали хромом и ванадием отмечается в работе [18]. Этот результат хорошо согласуется с разработанной В.И. Архаровым классификацией возможных сочетаний диффузانتов [11], согласно которой ближе к насыщаемому металлу располагается соединение того диффузанта, который обладает большей диффузионной подвижностью и распределение быстро диффундирующего диффузанта имеет экстремальный характер. Причиной такого распределения, как уже отмечалось выше, является ограниченная растворимость диффузанта (ванадия) в γ -фазе железа.

Согласно результатам измерений микротвердость покрытия составляет 1400–1980 HV, твердость диффузионного слоя в основном металле – 630–790 HV, основного металла – порядка 540–510 HV. На рис. 7 показана схема диффузионного покрытия и распределение твердости в нем.

Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Совместное диффузионное насыщение поверхности стали 35X2H3 ванадием и хромом приводит к формированию на поверхно-

сти металла внешнего диффузионного слоя, состоящего из градиентного по составу твердого раствора замещения трех элементов $\text{Cr}_{1,0}\text{V}_{0,4}\text{Fe}_{0,3}$ и карбидов ванадия и хрома.

2. Формирующиеся диффузионное покрытие имеет следующее строение: бесструктурный внешний слой, состоящий преимущественно из карбидов хрома и ванадия, → область столбчатых кристаллов (испытывающая $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при охлаждении), состоящая преимущественно их твердого раствора $\text{Cr}_{1,0}\text{V}_{0,4}\text{Fe}_{0,3}$, → частично обезуглероженная α -фаза → основной металл.

3. Коэффициенты диффузии хрома и ванадия в α -фазе составили $D_{Cr} = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_V = 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно; в γ -фазе $D_{Cr} = 1,13 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_V = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно.

4. Для хрома отмечено достаточно равномерное снижение концентрации от наружной поверхности вглубь основного металла, для ванадия наблюдается экстремум концентрации вблизи поверхности основного металла. Объясняется это большей диффузионной способностью ванадия в α -фазе при температуре насыщения.

5. Микротвердость внешнего поверхностного слоя составила 1400–1980 HV, диффузионного слоя в основном металле – 630–790 HV, основного металла – порядка 540–510 HV.

Список литературы

1. Ляхович Л.С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
2. Дубинин Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов. М.: Машиностроение, 1964. 450 с.

3. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1950. 433 с.
4. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1965. 493 с.
5. Применение метода неконтактный вакуумдиффузионной металлизации в промышленности / Г.М. Бородулин, Е.П. Пономаренко, В.Г. Касьяненко и др. // Защитные покрытия на металлах. Вып. 2. 1968. С. 134–138.
6. Юодис, А.П., Геллер, Ю.А. Хромирование штамповых сталей // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Вып. IV. М.: Машиностроение, 1972.
7. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства / А.М. Гурьев и др. // Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 28–34.
8. Галынская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сб. науч. тр. / под. ред. Л.Г. Ворошнина. Минск: Изд-во БНТУ, 2004. С. 48–52.
9. 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.
10. Прогрессивные методы химико-термической обработки / под. ред. Г.Н. Дубинина, Я.Д. Когана. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
11. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич, Э.Д. Щербаков. Минск: Наука и техника, 1974. 288 с.
12. Процессы взаимной диффузии в сплавах / И.Б. Боровский, К.П. Гуров, И.Д. Марчукова, Ю.Э. Угасте. М.: Наука, 1973. 360 с.
13. Шиняев А.Я. Диффузионные процессы в сплавах. М.: Наука, 1975. 228 с.
14. Горбунов Н.С. Диффузионные покрытия на железе и стали. М.: Академиздат, 1958. 206 с.
15. Земсков Г.В. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1968. 33 с.
16. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2. 1024 с.
17. Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: пер. с англ. / под ред. Л.А. Петровой. М.: Металлургия, 1985. 184 с.
18. Бутуханов В.А. Комбинированное упрочнение углеродистой инструментальной стали диффузионным хромованадированием и термоциклической обработкой: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 151 с.
19. Физическое металловедение / Я.С. Уманский, Б.Н. Финкельштейн, М.Е. Блантер и др. М.: Металлургиздат, 1955. 724 с.

References

1. Lyakhovich L.S. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1981. 424 p. (In Russ.)
2. Dubinin G.N. *Diffuzionnoye khromirovaniye splavov* [Diffusion chromium plating of alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1964. 450 p. (In Russ.)
3. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka stali* [Chemical-thermal treatment of steel]. Moscow: Mashgiz; 1950. 433 p. (In Russ.)
4. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1965. 493 p. (In Russ.)
5. Borodulin G.M., Ponomarenko E.P., Kas'yanenko V.G. et al. [Application of the method of non-contact vacuum diffusion metallization in industry]. In: *Zashchitnyye pokrytiya na metallakh. Vyp. 2* [Protective coatings on metals. Iss. 2]; 1968. P. 134–138. (In Russ.)
6. Yuodis A.P., Geller Yu.A. [Chrome plating of die steels]. In: *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Vyp. IV* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys. Iss. IV]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1972. (In Russ.)
7. Gur'ev A.M. et al. [Influence of borochrome plating parameters on steel structure and physical and mechanical properties]. *Polzunovskiy vestnik*. 2007;(3):28–34. (In Russ.)

8. Galynskaya N.A. [Features of the technology for obtaining complex diffusion coatings based on boron and chromium]. In: *Perspektivy razvitiya poverkhnostnogo i ob"emnogo uprochneniya splavov: sb. nauch. tr.* [Prospects for the development of surface and volume hardening of alloys: a collection of scientific papers]. Voroshnin L.G., editor. Minsk: BNTU Publ.; 2004. P. 48–52. (In Russ.)
9. 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.)
10. Dubinin G.N., Kogan Ya.D., editors. *Progressivnye metody khimiko-termicheskoy obrabotki* [Progressive methods of chemical-thermal treatment]. Moscow: Mashinostroenie; 1979. 184 p. (In Russ.)
11. 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.)
12. 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.)
13. Shinyaev A.Ya. *Diffuzionnye protsessy v splavakh* [Diffusion processes in alloys]. Moscow: Nauka; 1975. 228 p. (In Russ.)
14. Gorbunov N.S. *Diffuzionnye pokrytiya na zheleze i stali* [Diffusion coatings on iron and steel]. Moscow: Akademizdat; 1958. 206 p. (In Russ.)
15. Zemskov G.V. *Mnogokomponentnoe diffuzionnoe насыщение металлов и сплавов: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Multicomponent diffusion saturation of metals and alloys. Abstract of doct. diss.]. Moscow: Moscow institute of steel and alloys; 1968. 33 p. (In Russ.)
16. Lyakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: spravochnik* [State diagrams of binary metal systems: A handbook]. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie; 1997. 1024 p. (In Russ.)
17. Kubashevski O. Kubashevski O. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh sistem na osnove zheleza* [State diagrams of iron-based binary systems]. Transl. from Engl. Moscow: Metallurgiya; 1985. 184 p. (In Russ.)
18. Butukhanov V.A. *Kombinirovannoe uprochnenie uglerodistoy instrumental'noy stali diffuzionnym khromovanadirovaniem i termotsiklicheskoy obrabotkoy: dis. kand. tekhn. nauk* [Combined hardening of carbon tool steel by diffusion chromium vanadization and thermal cycling. Cand. sci. diss.]. Novosibirsk; 2018. 151 p. (In Russ.)
19. Umanskiy Ya.S., Finkel'shteyn B.N., Blanter M.E. et al. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical Metal Science]. Moscow: Metallurgizdat; 1955. 724 p. (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 25.12.2021

The article was submitted 25.12.2021