

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.268.6

© Чейлях А.П.<sup>1</sup>, Рябікіна М.А.<sup>2</sup>, Куцомеля Ю.Ю.<sup>3</sup>

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗИОННОГО ХРОМИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ ДЛЯ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

*Изучено влияние параметров диффузионного хромирования (состав стали, состав смеси) на структуру и физико-механические свойства покрытий из конструкционных и инструментальных марок стали. Построены математические модели, связывающие микротвердость, износостойкость, толщину диффузионного слоя. Определен рациональный состав стали и порошковой смеси, обеспечивающий существенное повышение износостойкости.*

**Ключевые слова:** модель, диффузионное хромирование, насыщающая смесь, фазовый состав.

*Чейлях О.П., Рябікіна М.А., Куцомеля Ю.Ю. Моделювання впливу параметрів дифузійного хромування на експлуатаційні та фізико-механічні властивості сталей для штампового інструменту. Вивчено вплив параметрів дифузійного хромування (склад сталі, склад суміші) на структуру та фізико-механічні властивості покриттів з конструкційних і інструментальних марок сталі. Побудовано математичні моделі, що зв'язують микротвердість, зносостійкість, товщину дифузійного шару. Визначено раціональний склад сталі та порошкової суміші, що забезпечує суттєве підвищення зносостійкості.*

**Ключові слова:** модель, дифузійне хромування, насичуюча суміш, фазовий склад.

*O.P. Cheiliakh, M.A. Ryabikina, Yu.Yu. Kutsomelia. Modeling the influence of the parameters the diffusion of chromium plating on operational and physical and mechanical properties of steels for stamping tool. The diffusion hardening steel can be produced in any plant having a thermal equipment, besides, it is more economical than obtaining an alloy steel with similar properties. The influence of the parameters of the diffusion of chromium plating (the composition of the steel, powder mixture) on the structure and mechanical properties of structural and tool steels was investigated. Results of X-ray analysis showed that the diffusion zone in the samples consists of two layers. First layer is predominantly carbides  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $Fe_3C$ . An intermediate layer composed of carbon-free solid solution of chromium in the iron. The maximum total thickness of the diffusion zone is observed in the steel 130Cr12V1 and 130Cr12Mo1 (~80  $\mu m$ ), minimum – in carbon steels 45, U10 (~10-30  $\mu m$ ). The thickness of carbide layer is approximately the same – 1-3  $\mu m$ . Analyzing of data micro-hardness measurement across the thickness of the diffusion zone it must be noted that the diffusion layers of the samples of the tool steels have a high micro-hardness 6000-10000. The maximum  $HV=10200$  was in steel 30Cr2W8V1. Chromium saturation of steel surface significantly increases its wear resistance. A much greater effect of increase of coefficient of relative wear resistance (3 fold increase) was*

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [cheilyakh\\_o\\_p@pstu.edu](mailto:cheilyakh_o_p@pstu.edu)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [maryna.ryabikina@mail.ru](mailto:maryna.ryabikina@mail.ru)

<sup>3</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [instant\\_juli@mail.ru](mailto:instant_juli@mail.ru)

*observed in steels 30Cr2W8V1, 130Cr12V1 and 130Cr12Mo1. The mathematical models relating the micro-hardness, wear resistance, the thickness of the diffusion layer were obtained. In view of the analytical relationships ascertained that the wear resistance of hardened steels substantially depend on the thickness of the diffusion coating, the micro-hardness of the layer and the core of steel and alloy steels has increased more than two times. For hardening steel punching tool 30Cr2W8V1 can be recommended composition of the powder mixture: 50% FeCr + 48% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% NaF, and for steel 130Cr12V1 preferably used as activator NH<sub>4</sub>F.*

**Keywords:** model, diffusion chromium plating, the saturation blend, phase composition.

**Постановка проблеми.** Хромирование используют для упрочнения деталей машин и инструмента, работающих на изнашивание и в агрессивных средах. Известно, что диффузионному хромированию подвергают стали различных классов, чугуны, сплавы на основе никеля, молибдена, вольфрама, ниобия, кобальта и металлокерамические материалы. Существует множество литературных данных описывающих насыщение поверхности изделий хромом [1-3]. Однако, данные о комплексном влиянии легирующих элементов на структуру и свойства диффузионного слоя в сталях при их хромировании ограничены. Следовательно, проблема научно-обоснованного легирования и определение рационального состава порошковой смеси для оптимизации механических свойств при диффузионном хромировании стальных образцов остается весьма актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Диффузионное упрочнение стали может производиться на любом предприятии, имеющем термическое оборудование, к тому же, оно экономически более выгодно, чем получение легированной стали с аналогичными свойствами. В результате диффузионного хромирования за 18-24 ч получают хромированный слой толщиной 2,0 – 2,5 мм с концентрацией на поверхности до 70 % хрома. Этот процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии до 800 °С. Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3 – 0,4 % С, повышает твердость и износостойкость. Твердость слоя, полученного при хромировании железа, достигает HV 250 – 300, а при хромировании стали HV 1200 – 1300 [1]. В работах [3, 4] приводятся данные о влиянии более экономичных в сравнении с порошковыми смесями насыщающих обмазок и паст на формирование защитного наноструктурного слоя в конструкционных и инструментальных марках сталей. Таким образом, для получения высокого комплекса эксплуатационных свойств, а также возможности управления этими характеристиками представляет несомненный интерес изучение влияния состава стали на формирование диффузионного слоя и подбор наиболее перспективных составов порошковых смесей.

**Цель статьи.** Исследование структуры, фазового состава диффузионных покрытий хромом в сталях различного состава и построение математических моделей, связывающих эти параметры с механическими и эксплуатационными характеристиками.

**Изложение основного материала.** В качестве исследуемого материала применялись углеродистые стали 45 и У10, а также легированные стали 4Х5В2ФС, 3Х2В8, Х12М и Х12МФ1 для изготовления штампового инструмента. Диффузионное хромирование стальных образцов проводилось при температуре 1000 °С, в течение 5 часов в порошковых смесях, которые отличались типом активатора (фтористой соли):

Смесь №1: 50% FeCr+48% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+2% NaF;

Смесь №2: 50% FeCr+48% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+2% NH<sub>4</sub>F.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Neophot–21, рентгеноструктурный анализ выполнен на дифрактометре ДРОН - УМ1 в Cu Kα излучении. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ–3 по ГОСТ 9450–76. Для определения износостойкости опытные образцы под нагрузкой подвергались трению скольжения о вращающийся ролик, диаметром 60 мм, изготовленный из быстрорежущей стали, в течение полу-часа. При расчете коэффициента ε за эталон принята сталь 45 после диффузионного насыщения хромом, следовательно, по уменьшению массы образцов можно судить об их износостойкости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta m_{45}}{\Delta m}, \quad (1)$$

где  $\Delta m_{45}$  – опытное уменьшение массы стали 45, г;  
 $\Delta m$  – потеря массы для других марок стали, г.

Визуальное исследование поверхности образцов показало, что хромирование в смесях №1 и №2 дает высокое качество поверхности, налипания смеси нет. Как известно [5], фтористый аммоний дает большую концентрацию хрома на поверхности образцов, что должно приводить к лучшим свойствам диффузионных слоев.

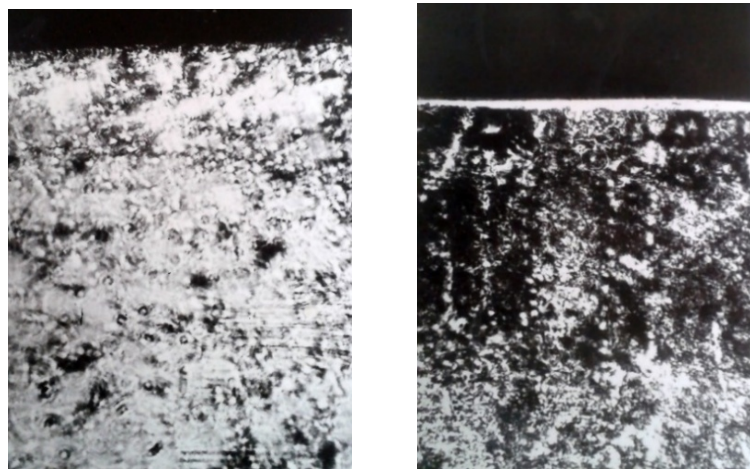
Металлографический анализ показал, что диффузионный слой на основе карбидов металлов выявляется в виде светлой нетравящейся зоны с четкой границей раздела (см. рис. 1). В зависимости от марки стали, микроструктура диффузионных слоев, их толщина и фазовый состав изменяются в довольно широких пределах.



Рис. 1 – Микроструктура покрытия на стали У10 ( $\times 600$ ) после диффузионного хромирования в смеси №2

В результате хромирования углеродистых сталей 45 и У10 на их поверхности образовался карбидный слой в виде столбчатых зерен, за которым располагается переходная зона твердого раствора хрома в железе. При хромировании в смеси №1 слой карбидов очень тонкий и неравномерно распределенный. Хромирование в смеси №2 позволило получить большую толщину карбидного слоя. После диффузионного насыщения стали 3Х2В8 в смеси №1, напротив, слой значительно больше, чем в смеси №2 (рис. 2, 3). При этом суммарная толщина покрытия  $\delta_{\Sigma} = \delta_{\text{карб.}} + \delta_{\text{переход.}}$  в смеси №1 больше, рис. 4. Максимальная  $\delta_{\text{карб.}}$  получена в стали Х12М (смесь №2) и составляет 3-4 мкм, что связано с влиянием углерода и ванадия на диффузию хрома. В смеси №1 карбидный слой в 3 мкм получен на стали У10. Структура сталей 3Х2В8 и 4Х5В2ФС состоит из тонкого карбидного слоя, за ним следует обезуглероженная светлая зона твердых растворов на основе хрома и железа ( $\delta_{\text{переход.}} \sim 50$  мкм). Образование этой зоны обусловлено реактивной диффузией углерода из приграничной зоны в карбидный слой, вследствие большего сродства хрома и углерода. Содержание W стали 4Х5В2ФС меньше, чем в 3Х2В8, следовательно, обезуглероженный слой меньше. Это согласуется с данными Юодиса А.П. и Геллера Ю.А. [5], которые исследовали аналогичные марки сталей (в качестве активаторов процесса авторы использовали  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и  $\text{NH}_4\text{J}$ ).

В результате хромирования углеродистых сталей 45 и У10 на их поверхности образовался карбидный слой в виде столбчатых зерен, за которым располагается переходная зона твердого раствора хрома в железе. При хромировании в смеси №1 слой карбидов очень тонкий и неравномерно распределенный. Хромирование в смеси №2 позволило получить большую толщину карбидного слоя. После диффузионного насыщения стали 3Х2В8 в смеси №1, напротив, слой значительно больше, чем в смеси №2 (рис. 2, 3). При этом суммарная толщина покрытия  $\delta_{\Sigma} = \delta_{\text{карб.}} + \delta_{\text{переход.}}$  в смеси №1 больше, рис. 4. Максимальная  $\delta_{\text{карб.}}$  получена в стали Х12М (смесь №2) и составляет 3-4 мкм, что связано с влиянием углерода и ванадия на диффузию хрома. В смеси №1 карбидный слой в 3 мкм получен на стали У10. Структура сталей 3Х2В8 и 4Х5В2ФС состоит из тонкого карбидного слоя, за ним следует обезуглероженная светлая зона твердых растворов на основе хрома и



а)

б)

Рис. 2 – Влияние состава насыщающей смеси на толщину слоя карбида хрома стали Х12М,  $\times 300$ : а) смесь №1; б) смесь №2

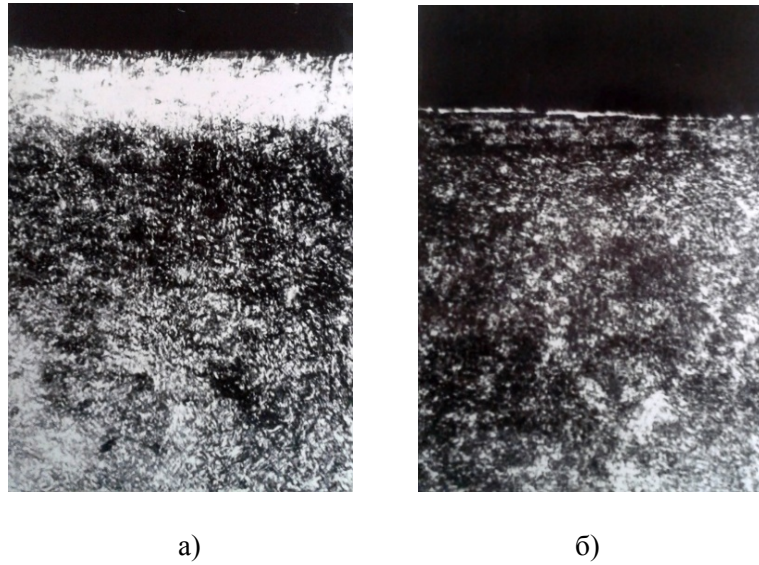


Рис. 3 – Влияние состава насыщающей смеси на толщину слоя карбида хрома стали 3X2B8,  $\times 300$ : а) смесь №1; б) смесь №2

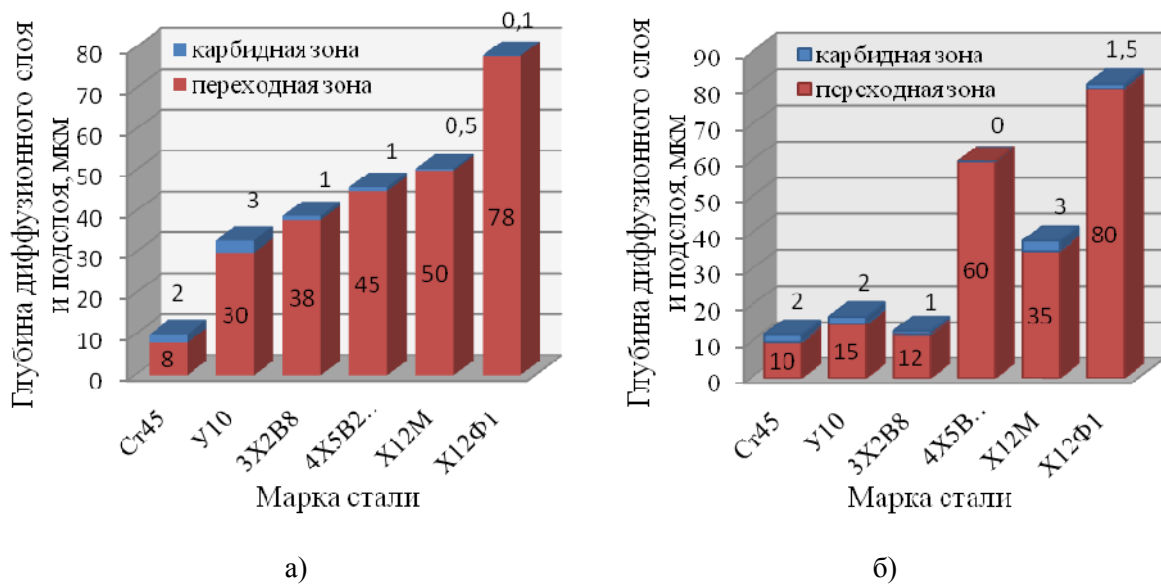


Рис. 4 – Глубина диффузионного слоя и подслоя на стальных образцах после хромирования: а) в смеси №1; б) в смеси №2

Хромирование в смеси №1 обусловило получение более высокой твердости образцов из сталей У10, Х12М и Х12Ф1, а в смеси №2 - 45, 4Х5В2ФС, 3Х2В8 (рис. 5). Минимальная микротвердость  $\sim 2800$  МПа хромированного слоя получена на стали 45, максимальная  $\sim 10000$  МПа – на стали 3Х2В8, далее в сторону убывания следуют стали 4Х5В2ФС, Х12М и Х12Ф1.

Рентгеноструктурный анализ поверхности хромированных образцов показал, что диффузионный слой состоит из карбидов двух типов  $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_7C_3$ , а также  $(Fe,Cr)_3C$  в эвтектоиде и зависит от активатора и состава стали. Для сталей У10, Х12М, Х12Ф1 карбидный слой состоит в основном из  $Cr_7C_3$ , а для сталей 3Х2В8 и 45 –  $Cr_{23}C_6$ , что объясняется различным содержанием углерода в сталях. Его толщина значительна на сталях 45, Х12Ф1, 3Х2В8.

В стали 4Х5В2ФС слой тонкий, неравномерный, под карбидной зоной располагается твердый раствор хрома в  $\alpha$  – железе с отдельными участками цементита. Фазовый состав поверхности и общая толщина диффузионного слоя после хромирования в смесях №1 и №2 приведен в таблице.

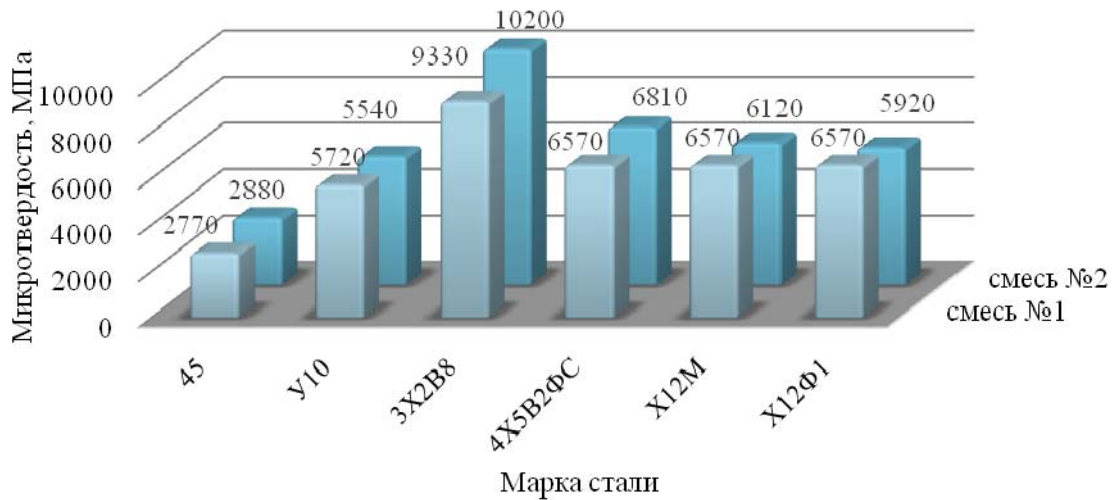


Рис. 5 – Микротвердость диффузионного слоя сталей после хромирования в смесях №1 и №2

Таблица

Фазовый состав поверхности и толщина диффузионного слоя хромированного стального образца в смесях №1 и №2

Марка стали	Суммарная толщина диффузионного слоя $\delta_{\Sigma}$ , мкм	Фазовый состав поверхности хромированного стального образца в направлении уменьшения интенсивности линий
<i>Смесь №1</i>		
45	10	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, следы Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
Y10	33	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
4X5B2ΦC	31	$\gamma$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
3X2B8	46	$\gamma$ -Fe, $\alpha$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C
X12M	78	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, следы Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
X12Φ1	50,5	Fe <sub>3</sub> C, $\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe
<i>Смесь №2</i>		
45	12	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, следы Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
Y10	17	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , $\gamma$ -Fe
4X5B2ΦC	60,5	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> C, следы Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>
3X2B8	13	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , Fe <sub>3</sub> C, $\gamma$ -Fe, $\alpha$ -Fe
X12M	38	$\alpha$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> C, $\gamma$ -Fe
X12Φ1	81,5	$\alpha$ -Fe, $\gamma$ -Fe, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>

Относительная износостойкость исследуемых сталей показана на рис. 6. Высокая износостойкость у сталей 3X2B8 (смесь № 1), X12M, X12Φ1 (смесь № 2). В целом, лучший результат получен при использовании состава порошковой смеси: 50 % FeCr + 48 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2 % NH<sub>4</sub>F (смесь № 2).

Построение аналитических зависимостей между физико-механическими и эксплуатационными свойствами (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя) исследованных сталей выполнялось с помощью электронных таблиц Microsoft Excel. Результаты математического моделирования представлены на рис. 7-11.

Регрессионные модели влияния содержания хрома в исследованных сталях на микротвердость представлены на рисунке 7 и имеют вид полинома второй степени. Высокие значения коэффициентов достоверности аппроксимации  $R^2 \geq 0,6$  позволяют не только проанализировать влияние Cr на твердость исследуемой стали, но и определить его оптимальное содержание в сталях, подвергаемых диффузионному хромированию. Как видно, максимальная микротвердость сердцевины HV ~ 7000 МПа соответствует концентрации хрома ~ 8 %.

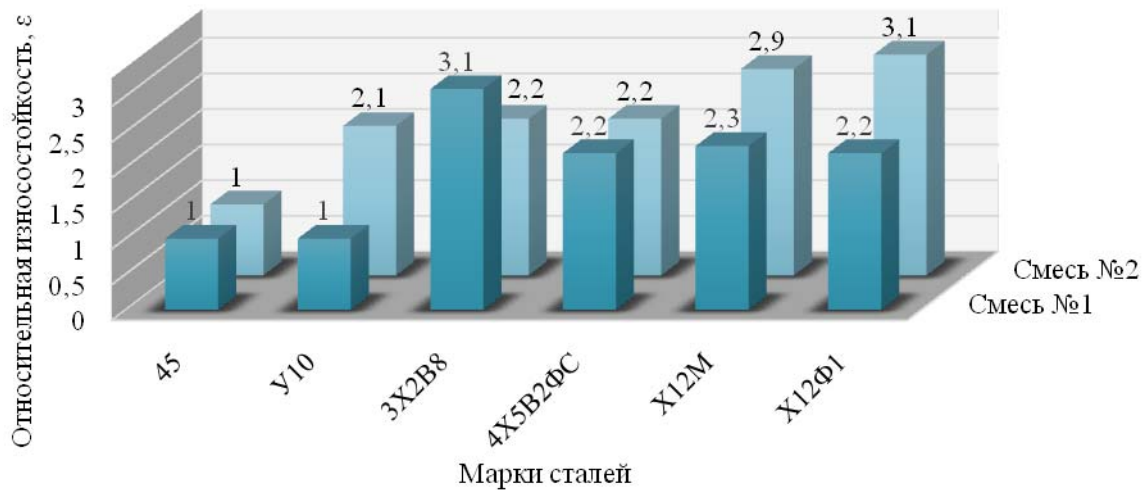


Рис. 6 – Относительная износостойкость сталей после хромирования в смесях №1 и №2

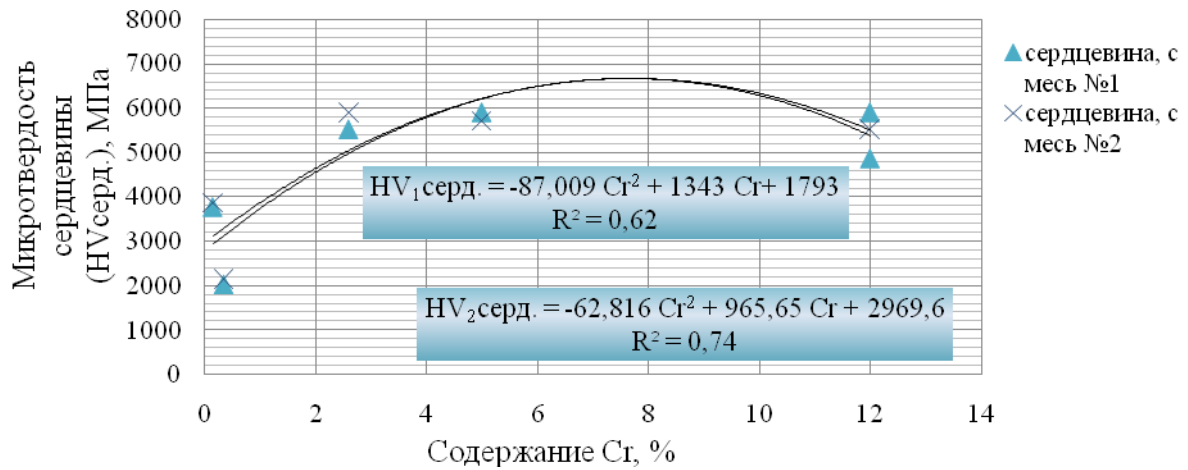


Рис. 7 – Влияние концентрации Cr на микротвердость сердцевины

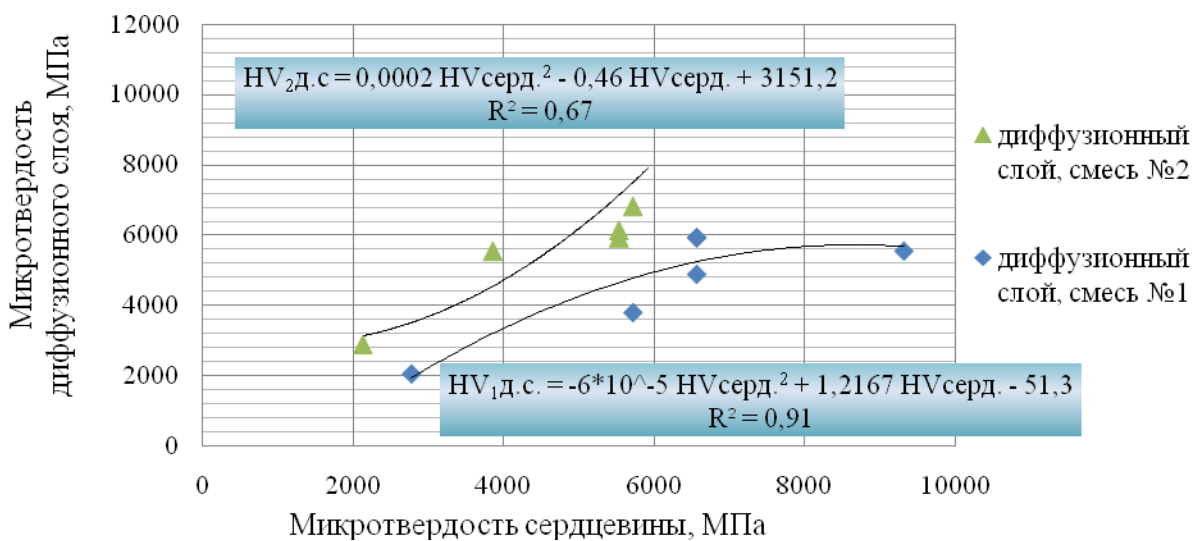


Рис. 8 – Регрессионные модели зависимости микротвердости диффузионного слоя от микротвердости сердцевины

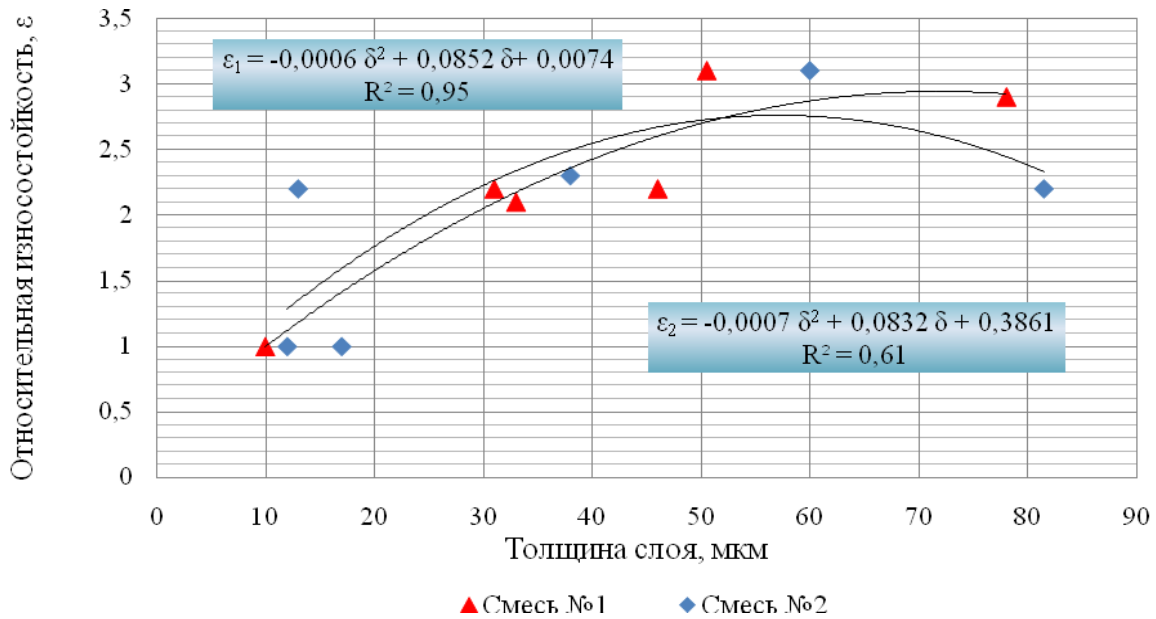


Рис. 9 – Влияние толщины диффузионного слоя на относительную износостойкость сталей

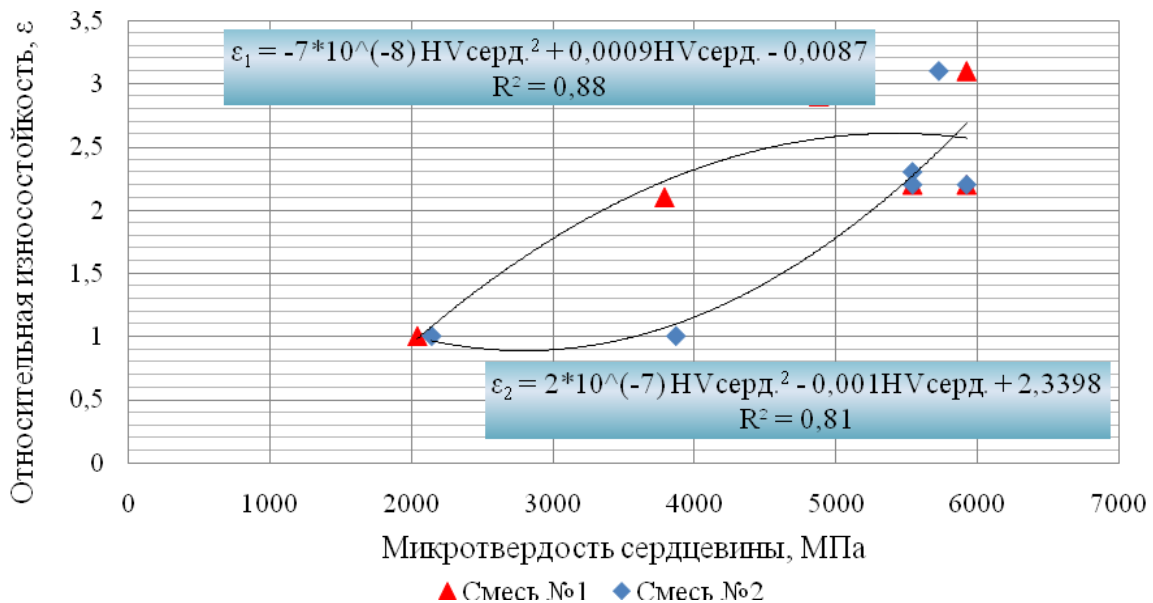


Рис. 10 – Регрессионные модели зависимости относительной износостойкости сталей от микротвердости сердцевинны

Взаимосвязь микротвердости диффузионного слоя и сердцевинны представлена на рис. 8. Представленные зависимости косвенно отражают влияние состава стали на структуру и фазовый состав диффузионного слоя.

В уравнении, описывающем зависимость относительной износостойкости от толщины диффузионного слоя (рис. 9), приняты следующие обозначения:  $\epsilon$  – относительная износостойкость;  $\delta$  – толщина диффузионного слоя, мкм.

Полученные математические модели имеют коэффициенты корреляции в пределах  $R \approx 0,8-1$ , что свидетельствует о существенном влиянии толщины слоя на физико-механические свойства диффузионных покрытий. В зависимости от марки стали при прочих равных условиях, микроструктура диффузионных слоев, их толщина и фазовый состав изменяются в довольно значительных пределах (см. табл.), что согласуется с данными работы [6].

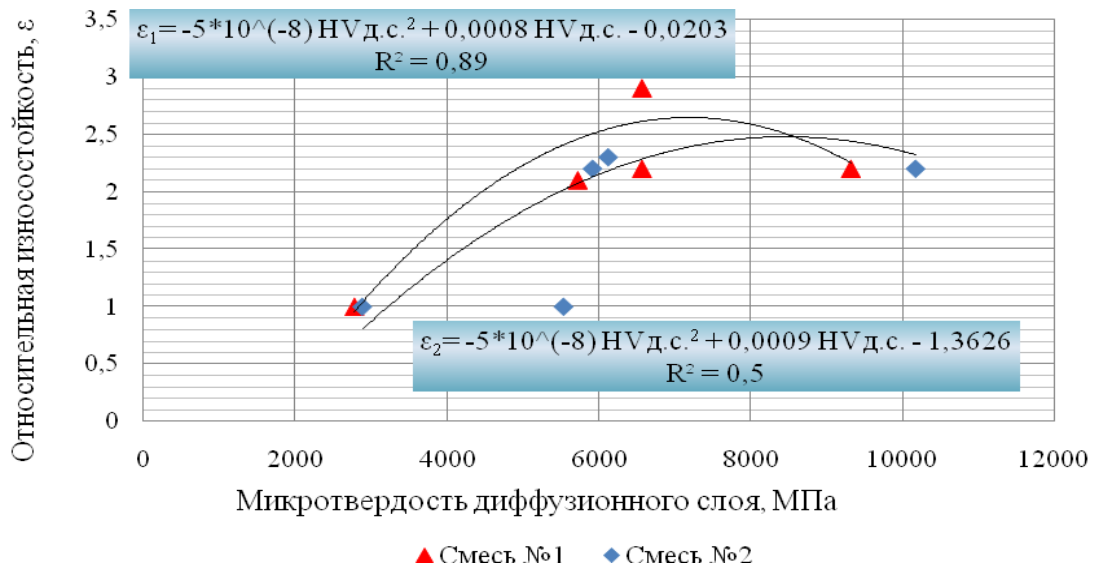


Рис. 11 – Экспериментальные и регрессионные зависимости относительной износостойкости от микротвердости диффузионного слоя

Влияние микротвердости сердцевины и покрытия на относительную износостойкость шести марок сталей представлены на рис. 10-11. Как видно из рисунка 10, с увеличением твердости сердцевины относительная износостойкость сталей 45, У10, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС, Х12М и Х12Ф1 плавно возрастает. Высокая твердость сердцевины предотвращает также вдавливание покрытия при эксплуатации деталей и инструмента.

Как отмечают авторы работы [7], не во всех случаях высокая микротвердость покрытия обуславливает высокую износостойкость, аналитические кривые на рисунке 11 проходят через максимум  $\epsilon=2,5$  при  $HV=7000-8000$  МПа.

### Выводы

1. Исследованы и описаны структуры диффузионных слоев, полученных насыщением сталей 45, У10, 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС, Х12М и Х12Ф1 хромом в порошковых смесях, отличающихся составом насыщающей смеси. Установлено, что на поверхности всех сталей образовался тонкий ( $\delta \leq 3$  мкм) слой карбидов хрома, за которым следует обедненная по углероду (за счет его направленной диффузии в получаемый слой) зона твердого раствора хрома в железе. Фазовый состав карбидного слоя зависит от состава смеси и марки стали.
2. В результате диффузионного насыщения хромом относительная износостойкость легированных сталей увеличилась более чем в 2 раза. Максимальная относительная износостойкость ( $\epsilon=3,1$ ) получена в сталях 3Х2В8Ф (смесь №1) и Х12Ф1 (смесь №2).
3. Установлены аналитические зависимости, связывающие состав стали, эксплуатационные и физико-механические свойства (микротвердость, износостойкость, толщина диффузионного слоя), после диффузионного хромирования в смесях, представляющие адекватные полиномиальные уравнения второй степени.
4. С учетом полученных аналитических зависимостей установлено, что износостойкость упрочненных сталей существенно зависит от толщины диффузионного покрытия, микротвердости слоя и сердцевины, состава стали. Для упрочнения штампового инструмента из стали 3Х2В8Ф можно рекомендовать состав порошковой смеси №1 с активатором NaF, а для стали Х12Ф1 предпочтительнее использовать в качестве активатора  $NH_4F$ .

### Список использованных источников:

1. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учебное пособие / Т.Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.
2. Dennis J.K. Nickel and chromium plating / J.K. Dennis, T.E. Such. – 3rd edition. – Somerset : Woodhead publishing Ltd and ASM International, 1993. – 442 p.



3. Диффузионное хромирование сталей из насыщающей обмазки / С.Г. Иванов [и др.] // Ползуновский альманах. – 2006. – № 3. – С. 191.
4. Иванов С.Г. Хромирование сталей из насыщающих паст / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев // Фундаментальные исследования. – 2006. – №. 11. – С. 73-74.
5. Юодис А.П. Диффузионное хромирование штамповых сталей / А.П. Юодис, Ю.А. Геллер // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1968. – №5. – С. 73-78.
6. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента / М.А. Гурьев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2010. – №. 1. – С. 114-121.
7. Структура и свойства стали 40X после импульсно-плазменной обработки с использованием титанового электрода / А.П. Чейлях [и др.] // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science. – 2013. – Vol. 8. – С.79-84.

**Bibliography:**

1. Stepanova T.Yu. Technology of surface hardening of machine parts : a tutorial / T.Yu. Stepanova; Ivan. state chem-tehnol. university. – Ivanovo, 2009. – 64 p. (Rus.)
2. Dennis J.K. Nickel and chromium plating / J.K. Dennis, T.E. Such. – 3rd edition. – Somerset : Woodhead publishing Ltd and ASM International, 1993. – 442 p.
3. Diffusion of chromium steels saturating wash / S.G. Ivanov [et al.] // Polzunovsky al'manakh. – 2006. – № 3. – P. 191. (Rus.)
4. Ivanov S.G. Chromium steels of saturating paste / S.G. Ivanov, A.M. Gur'ev // Fundamental research. – 2006. – № 11. – P. 73-74. (Rus.)
5. Yuodis A.P. Diffusion chromium die steels / A.P. Yuodis, Y.A. Geller. – Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya, 1968. – №5. – P. 73-78. (Rus.)
6. Complex diffusion hardening of heavy duty machinery parts and tools / M.A. Gur'ev [et al.] // Polzunovsky al'manakh. – 2010. – №. 1. – P. 114-121. (Rus.)
7. The structure and property of 40X steel grade after plasma treatment with application of titanium electrode / A.P. Cheilyakh [et al.] // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science. – 2013. – Vol. 8. – P. 79-84.

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.10.2014

УДК 691.87:691.714:539.434

© Вакуленко И.А.<sup>1</sup>, Ефременко В.Г.<sup>2</sup>

**ПОВЕДЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ**

*В статье на примере низкоуглеродистой стали проведен анализ влияния размера зерна феррита на развитие пластического течения в условиях статического и циклического нагружения. Осуществлена оценка требуемой плотности подвижных дислокаций для поддержания условий непрерывности распространения пластической деформации.*

**Ключевые слова:** плотность подвижных дислокаций, твердорастворное упрочнение, размер зерна феррита, усталостная прочность, дислокационная ячейка.

**Вакуленко І.О., Єфременко В.Г. Поведінка низьковуглецевої сталі при статичному і циклічному навантаженнях.** У статті, на прикладі низьковуглецевої ста-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна», г. Днепропетровск

<sup>2</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь