

## ВЛИЯНИЕ ХРОМА НА МОРФОЛОГИЮ КАРБИДНЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕМЕНТОВАННЫХ СТАЛЯХ И В ЖЕЛЕЗОХРОМИСТЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ

© 2010 В.Г. Сальников<sup>1</sup>, В.Н. Гадалов<sup>1</sup>, Д.В. Колмыков<sup>2</sup>, А.Г. Романенко<sup>2</sup>,  
Д.Н. Романенко<sup>1</sup>, А.В. Ляхов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск

<sup>2</sup> Курская государственная сельскохозяйственная академия  
им. профессора И.И. Иванова

Поступила в редакцию 05.11.2010

Предложен механизм влияния хрома, присутствующего в цементованных сталях, на форму и размеры карбидных частиц, образующихся в диффузионных слоях при науглероживании. Показано, что в сталях, содержащих менее 2,1% хрома, карбиды образуются в виде тонких пластин, в сталях с большим содержанием хрома – в виде равноосных округлых включений. Вышесказанное подтверждают исследования, проведенные на железохромистых электролитических покрытиях.

Ключевые слова: *науглероживание, хром, цементация, сталь, карбидные включения*

Форма карбидных частиц, выделяющихся из твердого раствора при цементации стали, решающим образом влияет на результаты цементации. Если карбиды выделяются в виде корки на поверхности и сетки по границам зерен, они перекрывают пути диффузии углерода в глубину изделия и скорость цементации резко снижается. Если карбиды имеют сферическую форму и рассредоточены в металлической матрице равномерно, углерод с поверхности относительно легко по участкам твердого раствора между карбидами может проникать на достаточно большую глубину. Кроме того, механические свойства структуры с грубой карбидной (цементитной) сеткой весьма невысоки, структура же с мелкодисперсными округлыми включениями карбидов в пластичной матрице имеет достаточно высокие механические свойства и исключительно высокую износостойкость. Поэтому несомненный интерес представляет анализ условий, при которых в

диффузионных слоях цементуемых сталей могут образоваться карбидные включения сферической формы.

Согласно классической теории кристаллизации, после образования зародыша карбидной частицы его граница движется в сторону исходной фазы (аустенита). Движущей силой этого процесса является изменение свободной энергии кристалла с растущей карбидной частицей. При температуре цементации, когда упругие свойства аустенита практически не проявляются, избыточная энергия затрачивается на образование межфазной границы. Поверхностную энергию межфазной границы можно представить следующим выражением:

$$\Delta G_{\text{пов}} = \xi \alpha S_k, \quad (1)$$

где  $\xi$  – коэффициент соответствия;  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $S_k$  – площадь поверхности карбидной частицы.

Поскольку коэффициент поверхностного натяжения определяет кривизну границы изолированной части системы, для определения степени кривизны границы (размеров сферического зерна) можно использовать выражение, описывающее изменение размеров частиц новой фазы при рекристаллизации [1].

$$R^2 = R_0^2 + \alpha k \tau, \quad (2)$$

где  $R$  и  $R_0$  – радиусы растущего и исходного зерен;  $k$  – постоянная, зависящая от температуры;  $\tau$  – время.

*Сальников Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и сварочного производства. E-mail: svarka-kstu@mail.ru*

*Гадалов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и сварочного производства. E-mail: Gadalov-VN@yandex.ru*

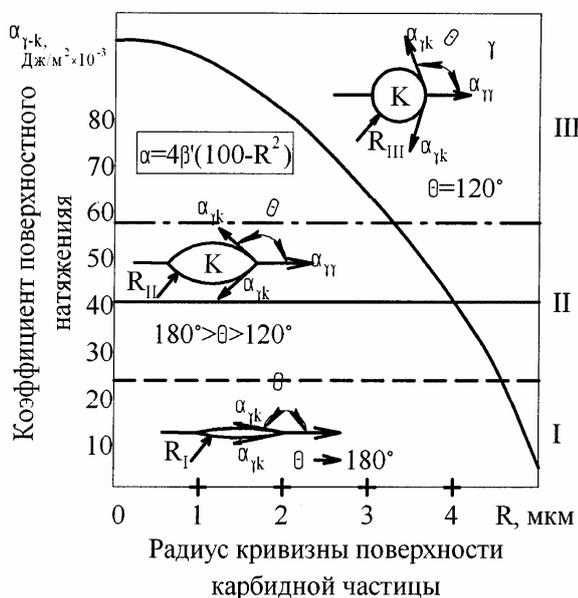
*Колмыков Денис Валерьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электротехники и механизации животноводства. E-mail: kodan@mail.ru*

*Романенко Анна Геннадьевна, аспирантка. E-mail: academy@kgsha.ru*

*Романенко Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой материаловедения и сварочного производства. E-mail: Romanenko-kstu46@yandex.ru*

*Ляхов Андрей Владимирович, аспирант*

Эта закономерность, очевидно, будет справедлива и для случая роста карбидной частицы при науглероживании аустенита. Если в аустените растёт частица цементита, поверхность которой плоская, поверхностное натяжение на её границе с аустенитом будет меньше, чем натяжение на границе между аустенитными зёрнами (см. схему на рис. 1). Отсюда следует что при известном коэффициенте поверхностного натяжения на границе аустенит-аустенит  $\alpha_{\gamma\gamma}=40$  эрг/см<sup>2</sup>, что соответствует радиусу частицы равному бесконечности, для частицы с радиусом кривизны поверхности 10 мкм, поверхностное натяжение границы будет по крайней мере в два раза меньше. Обозначить это, предполагая, что кривая граница принадлежит цементитному включению, можно следующим образом  $\alpha_{\gamma\kappa}=20$  эрг/см<sup>2</sup> ( $20 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>).



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента поверхностного натяжения границы «аустенит – цементит» ( $\alpha_{\gamma\kappa}$ ) от радиуса кривизны этой границы: I)  $\alpha_{\gamma\kappa} < \alpha_{\gamma\gamma}$  – включение плоской формы; II)  $\alpha_{\gamma\kappa} \approx \alpha_{\gamma\gamma}$  – переходная форма включения; III) -  $\alpha_{\gamma\kappa} > \alpha_{\gamma\gamma}$  – включение сферической формы

Исходя из найденных значений коэффициента поверхностного натяжения (начальных условий) и вида зависимости, обозначенной формулой (2), выразим связь между коэффициентом поверхностного натяжения границы карбидной частицы и ее радиусом следующим образом:

$$\alpha = 4\beta'(100 - R^2), \quad (3)$$

где  $\beta' = K\tau^{-1}$  - постоянная величина, определяемая температурой и длительностью цементации ( $\beta' = 4 \cdot 10^{-3}$ ). График зависимости представлен на рис. 1.

В различных работах [2, 3] приводятся экспериментальные данные о влиянии легирования стали хромом на размеры карбидных включений, образующихся в диффузионных слоях при цементации, из которых следует, что радиус цементитного включения связан с содержанием в стали хрома следующим выражением:

$$R = 10,5 / C_{Cr}, \quad (4)$$

где  $C_{Cr}$  – содержание в стали хрома, % ат.

Известно, что при увеличении содержания хрома в стали радиус карбидных частиц заметно уменьшается, вначале очень интенсивно, при дальнейшем увеличении содержания хрома – медленнее. Подставив в выражение (1) значения площади поверхности сферической частицы, выраженное через ее радиус (4), получим значение поверхностной энергии, связанное с количеством хрома в стали:

$$G_{пов} = \xi 42\pi\alpha / C_{Cr} \quad (5)$$

Расчеты, проведенные с использованием выражений (3) и (5), показывают, что критическое содержание хрома в цементуемой стали равно 2,1%. Если концентрация хрома меньше критического содержания (меньше 2,1%), то цементитные частицы в диффузионных слоях образуются только в пластинчатой форме, независимо от условий цементации. При концентрациях, больших критической, карбидные включения при цементации образуются только равноосными. Цементация железохромистых электролитических покрытий, проведенная в высокоактивном карбюризаторе, подтвердила выводы приведенного выше теоретического анализа (рис. 2).

В сплаве, содержащем 0,44% Cr, карбидные включения образовались в виде сетки по границам зёрен и корки на поверхности. В образце, содержащем хрома 1,71% Cr, карбидные включения имеют переходную форму. В образце с содержанием хрома выше критического количества (2,48%) карбидные включения имеют форму изолированных сферических включений.

**Выводы:** хром, присутствующий в цементуемой стали, значительно влияет на форму образующихся при цементации карбидных включений. Растворяясь в цементите, хром увеличивает коэффициент поверхностного натяжения растущего карбидного зерна, искривляя межфазную границу и способствуя росту карбида в виде равноосного изолированного включения. Критическая концентрация хрома, при которой становится возможным образова-

ние сферических карбидных частиц в цементованных слоях, составляет 2,1%. При содержании хрома ниже указанного значения карбидные включения образуются в виде тонких прослоек по границам зерен и поверхностной корки.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Уманский, Я.С. Физика металлов. – М.: Атомиздат, 1978. 352 с.
2. Переверзев, В.М. Термодинамические условия образования зернистого цементита в диффузионном слое легированной стали в процессе цементации // Новое в металлведении и термической обработке металлов. Мат. Всесоюзной науч.-техн. конф. – Тольятти, 1979. С. 4-67.
3. Переверзев, В.М. Кинетика диффузионного роста цементитных частиц в аустените при цементации хромистой стали // Известия АН СССР. Металлы. 1980. №1. С. 197-200.

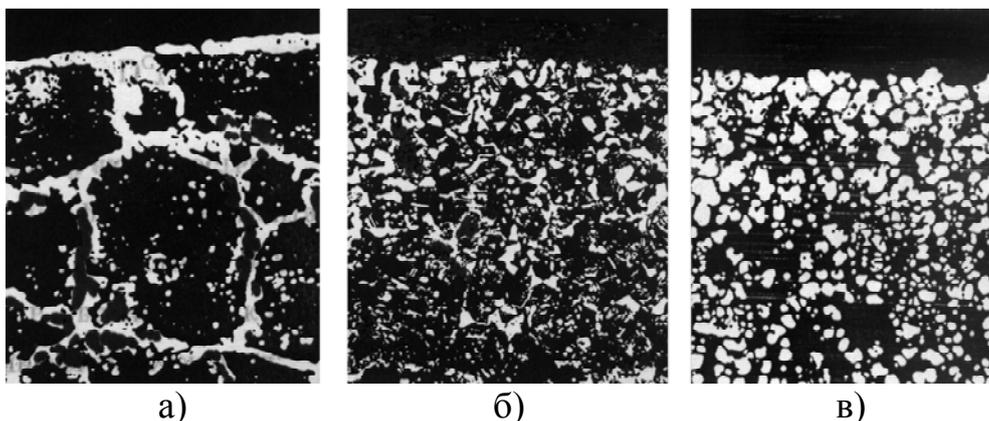


Рис. 2. Микроструктуры цементованных гальванических железохромистых сплавов (покрытий) с различным содержанием хрома: а) 0,44% Cr; б) 1,71% Cr; в) 2,48% Cr ( $\times 300$ )

**INFLUENCE OF CHROME ON MORPHOLOGY OF CARBIDE PARTICLES IN CONVERTED STEELS AND IN IRON-CHROME ELECTROLYTIC COVERINGS**

© 2010 V.G. Salnikov<sup>1</sup>, V.N. Gadalov<sup>1</sup>, D.V. Kolmykov<sup>2</sup>, A.G. Romanenko<sup>2</sup>,  
D.N. Romanenko<sup>1</sup>, A.V. Lyahov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Southwest State University, Kursk  
<sup>2</sup> Kursk State Agricultural Academy named after Professor I.I. Ivanov

The mechanism of influence of chrome which is present in converted steels, on the shape and the sizes of carbide particles, formed in diffusive layers at carbonizing is offered. It is shown, that in steels, containing less than 2,1% of chrome, carbides are formed in the form of thin plates, in steel with the greater contents of chrome - in the form of equiaxial spherical inclusions. The aforesaid is confirmed with the researches lead on iron-chrome electrolytic coverings.

Key words: carbonizing, chrome, cementation, steel, carbide inclusions

Vladimir Salnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Materials Technology and Welding Manufacture. E-mail: svarka-kstu@mail.ru

Vkadamir Gadalov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Materials Technology and Welding Manufacture. E-mail: Gadalov-VN@yandex.ru

Denis Kolmykov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Electrical Engineering and Mechanization of Animal Industry. E-mail: kodan@mail.ru

Anna Romanenko, Post-graduate Student. E-mail: academy@kgsha.ru

Dmitriy Romanenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head at the Department of Materials Technology and Welding Manufacture. E-mail: Romanenko-kstu46@yandex.ru

Andrey Lyahov, Post-graduate Student