

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОЙ
БОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПРОВОЛОКИ**

ДАШКЕВИЧ В. Г.¹, СЕМЕНЧЕНКО М. В.²

**¹(Белорусский национальный технический университет;
г. Минск, Республика Беларусь)**

**²(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
г. Новополоцк, Республика Беларусь)**

Научные принципы диффузионного легирования и обширный практический опыт в настоящее время позволяют синтезировать различные типы наплавочных сплавов на основе уже существующих порошковых и проволочных материалов [1–4]. К ключевым преимуществам использования диффузионного легирования для получения новых наплавочных материалов можно отнести:

- возможность регулирования структуры и свойств наплавленного слоя благодаря добавлению легирующих компонентов и модификаторов структуры;
- улучшение технологических характеристик процесса наплавки (в частности, повышение флюсования металла в процессе наплавки);
- возможность производства ограниченных партий наплавочного материала с заданным составом и свойствами.

Уже продолжительное время ведутся работы по созданию гаммы наплавочных сплавов на основе углеродистых и низколегированных проволок подвергнутых диффузионному легированию бором и карбидообразующими элементами (Cr, Mn и др.). При диффузионном легировании бором в поперечном сечении такая проволока представляет собой стальной сердечник, окруженный диффузионным боридным слоем преимущественно типа $(Fe, Me)_2B$, для которого характерна игольчатая морфология боридной фазы [4].

Бор, являясь поверхностно-активным элементом и сильным карбидо- и боридообразователем, существенно изменяет термодинамическую активность компонентов в зоне плавления. В отличие от классических литых сварочных проволок, диффузионно-легированная проволока имеет сложное многослойное строение: железная основа с диффузионным слоем, содержащим до 4,0 % В, до 25 % Cr, 1–3 % Mn и др.

На микроструктуре борохромированной проволоки сталь 70 (рисунок 1) является двухфазный слой: в наружной зоне фаза $(Fe, Cr)B$, во внутренней зоне слоя $(Fe, Cr)_2B$ и перлитная структура ядра. Толщина слоя после обработки в течение 2,5 ч при температуре 1000 °С составляет примерно 100 мкм. Микротвердость

оболочки изменяется от 22 ГПа до 13 ГПа, что соответствует микротвердости фаз $(\text{Fe, Cr})\text{B}$ и $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$, соответственно.

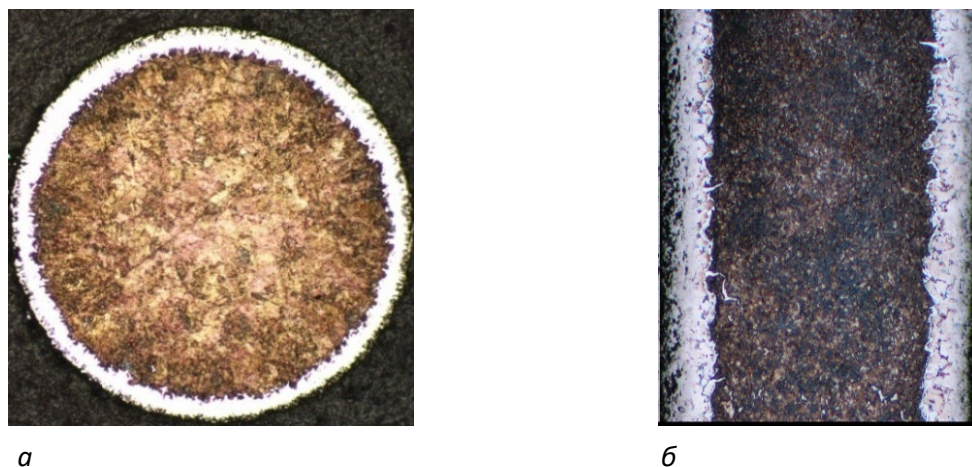


Рисунок 1 – Микроструктура в поперечном (а) и продольном сечении (б) поверхностно-легированной (борохромированной) проволоки Сталь 70, $\times 50$

Активность легирующих элементов при плавлении диффузионно-легированной в печи борсодержащей проволоки исследовалась на специальной лабораторной установке [5] в условиях использования внутреннего источника нагрева (тепловой энергии электрического тока, пропускаемого через проволоку в режиме термоциклирования). В этом случае тепловой поток распространялся от сердцевины проволоки, имеющей меньшее электрическое сопротивление, к диффузионному слою с более высокой температурой плавления [6]. Использование внутреннего нагрева помогло избежать деборирования поверхностного слоя, наблюдаемого при длительной выдержке в условиях печного (внешнего) нагрева. Продолжительность отжига диффузионно-легированной в печи борсодержащей проволоки составляла 45 секунд вместо нескольких часов при традиционной обработке при печном нагреве.

В условиях циклического электроконтактного нагрева растворение борированного слоя начиналось на границе «диффузионный слой – основной металл» из-за более низкой температуры плавления указанной зоны. Толщина сформированного диффузионного слоя начала увеличиваться, так как бор начал активно диффундировать в направлении к центру проволоки. Твердость диффузионного слоя снижалась за счет формирования структуры, имеющей меньшую концентрацию бора.

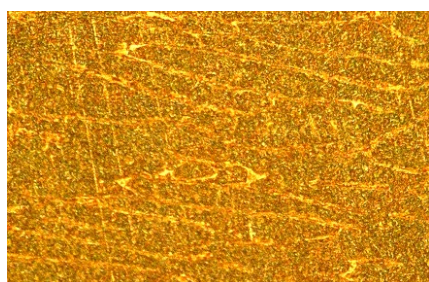
При выборе режима обработки (продолжительности нагрева и охлаждения) обеспечивалась непрерывность обработки. При значительном тепловложении существует риск выхода жидкой фазы, образующейся на «диффузионный слой – основной металл», на поверхности проволоки. Это ухудшит условия последующей наплавки или напыления борсодержащей проволоки.

При грамотном подборе величины напряжения, времени оказываемого термического воздействия можно обеспечить такое перераспределение бора, при котором диффузионный слой будет иметь структуру эвтектического типа с меньшей склонностью к скалыванию, чем одно- и двухфазные слои. Это позволит использовать проволоку для нанесения защитных покрытий различными способами, не опасаясь скалывания диффузионного слоя из-за высокой твердости последнего.

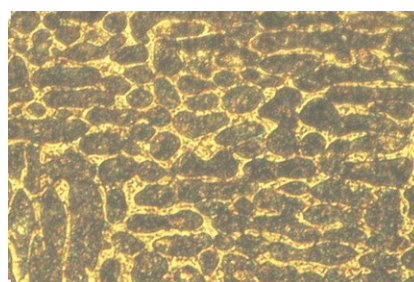
Анализировалось плавление диффузионно-легированной в печи борсодержащей проволоки и растворение диффузионного слоя при наплавке [4] без предварительного отжига в условиях циклического электроконтактного нагрева. Отмечено, что при плавлении такой проволоки возникает резкий перепад химических потенциалов между расплавом проволоки и основным металлом. Бор, имея малый атомный радиус и высокую электроотрицательность, формирует направленные ковалентные связи с атомами переходных металлов. Это приводит к снижению активности железа (бор связывает железо в бориды) и повышение активность, например, хрома вследствие вытеснения хрома из жидкой фазы при кристаллизации боридов.

В зоне с максимальным градиентом концентрации бора формируется прослойка сложных боридов $(Fe, Cr)_2B$, которая действует как диффузионный барьер для дальнейшего выравнивания концентраций. Это объясняет аномально медленную гомогенизацию при последующем охлаждении.

Металлографический и фазовый анализ наплавленных слоев при различном времени химико-термической обработки (ХТО) борохромированной проволоки показал, что морфология структуры претерпевает значительные изменения. В покрытиях с увеличением времени обработки проволоки в порошковых смесях более 2 ч характерно появление участков эвтектики состава: перлит + $(Fe, Cr)_2B$, а затем рост ее объемной доли. Происходит смыкание участков и образование сетки по границам зерен эвтектоида. Сетка образует каркас, в узлах которой, фрагментами наблюдаются выделения боридов $(Fe, Cr)_2B$ в форме ромбов и призм (рисунок 2).



2 ч ХТО



3 ч ХТО

Рисунок 2. – Микроструктуры наплавленных борохромированной проволокой слоев, $\times 500$

Результатом наплавки такого рода материала является закономерно высокая износостойкость в условиях абразивного изнашивания, за счет формирования участков эвтектик. Интегральная микротвердость эвтектики составляет $H_{50} = 7800 \pm 1500$ МПа, эвтектоидной матрицы – $H_{50} = 2920 \pm 450$ МПа.

Таким образом, градиент концентрации между диффузионным слоем и основной определяет начальные стадии массопереноса в зоне плавления. Для каждой схемы легирования, фазового состава и структуры интенсивность образования жидкой фазы на границе раздела диффузионный слой – стальная сердцевина различна. Учет термодинамической активности легирующих элементов для оценки и прогнозирования процесса плавления и образования упрочняющих фаз обязателен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф.И. Пантелеенко. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.М. Константинов; ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси». – Мн., 2008. – 46 с.
3. Карпец М.Н. Процесс получения защитных покрытий с повышенной адгезией из борированной стальной проволоки гиперзвуковой металлизацией на деталях калийной отрасли / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 Сварка, родственные процессы и технологии / М.Н. Карпец; МОУВО "Белорусско-Российский университет". – Мн., 2025. – 22 с.
4. Дашкевич, В.Г. Поверхностно-легированная стальная проволока для наплавки деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.Г. Дашкевич; ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси». – Мн., 2009. – 23 с.
5. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 C21D 1/40 – В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № и 20020065; заявл. 05.03.02., Опубл. 30.12.02
6. Семенченко, М. В. Особенности диффузионного легирования стальной проволоки с применением циклического электронагрева / М. В. Семенченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 159–164. – EDN UIIMVP.