

УДК 532.72:620.198

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДОЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО БОРИРОВАНИЯ

¹Гадалов В.Н., ¹Филонович А.В., ¹Беседин А.Г., ¹Ворначева И.В., ²Тураева О.А.

¹Юго-Западный государственный университет, Курск;

²Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, e-mail: vornairina2008@yandex.ru

Рассмотрена математическая модель, описывающая динамику роста боридных слоев Fe₂B и FeB. Изучено напряженное состояние в фазах FeB и Fe₂B при электролизном борировании стальных образцов (сталь 45). Электролиз проводился в две стадии. Исследована микроструктура борированного слоя на образцах после электролиза, а также распределение поля остаточных напряжений в фазах FeB и Fe₂B с помощью рентгенографической методики. Определены основные причины возникновения остаточных напряжений в борированных слоях, получены эпюры напряжений. Эпюры напряжений рассчитывали по стандартной программе «построение парного уравнения регрессии» на ПЭВМ. Установлено, что характер распределения напряжений в большей степени зависит от режима борирования (наличие одной или двух боридных фаз в поверхностном слое), чем от термообработки после борирования. Установлено, что применение неразрушающего метода исследования напряженного состояния в поверхностных слоях изделий является эффективным средством контроля при химико-термической обработке.

Ключевые слова: сталь, борирование, напряженное состояние, остаточные напряжения, износостойкость, усталостная прочность, фаза, поверхностный слой

THE RESEARCH STRESS STATE IN SURFACE LAYERS OF HYPOEUTECTOID STEEL AFTER ELECTROLYSIS BORATING

¹Gadalov V.N., ¹Filonovich A.V., ¹Besedin A.G., ¹Vornacheva I.V., ²Turaeva O.A.

¹South-West State University, Kursk;

²Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh, e-mail: vornairina2008@yandex.ru

A mathematical model describing the dynamics of growth of boride layers and Fe₂B FeB is considered. The state of stress in the phases and FeB Fe₂B when electrolysis boriding of steel samples (steel 45) stud-ied. Electrolysis was carried out in two stages. Microstructure of borated layer on the samples after electrolysis, as well as the distribution of the residual stress field in phases and FeB Fe₂B using radiographic techniques are investigated. The main causes of residual stresses in borated layers are defined stress distribution is obtained. Diagrams of stress was calculated from the standard program «to build a pair of regression equation» on the PC. It is found that the nature of the distribution of stresses is largely dependent on the mode of boriding (presence of one or two phases of boride in the surface layer) than the heat treatment after the boriding. It was found that the use of non-destructive method of stress state research articles layers surfaces is an effective monitoring tool for chemical and heat treatment.

Keywords: steel, borating, state of stress, residual stress, wear resistance, fatigue resistance, phase, surface layer

Одна из важнейших задач современного металловедения – создание новых технологий, позволяющих экономить энергетические и трудовые ресурсы машиностроительных предприятий, уменьшить расход дорогостоящих металлов и сплавов, увеличить надежность и ресурс двигателей, турбин аппаратов, различных машин и механизмов.

Как показывают исследования, создание высокоэффективных защитных диффузионных покрытий зачастую является единственным возможным средством улучшения эксплуатационных свойств ответственных деталей. Один из перспективных методов – процесс диффузионного насыщения металлов и сплавов бором, в результате чего на поверхности обрабатываемых изделий формируются химические соединения бориды, обладающие высокими антикоррозионны-

ми и износостойкими характеристиками в сочетании с жаропрочностью и жаростойкостью, обеспечивающими их широкое применение в различных отраслях машиностроения, химической и нефтегазовой промышленности.

Цель борирования – получение в поверхностном слое изделий из стали боридов железа, обеспечивающих высокую твердость поверхности.

При диффузионном насыщении железа и сталей бором применяются методы газового, жидкостного и электролизного борирования. Строение боридного покрытия определяется химическим составом базового материала, режимами насыщения и типом боросодержащей насыщающей среды [1]. Температура процесса влияет на структуру основного бориды.

Износостойкость борированных стальных изделий зависит в большой степени от качества поверхностного слоя и структуры, получаемой при химико-термической обработке [2–4].

Сведения о влиянии борирования на усталостную прочность до настоящего времени носят противоречивый характер [2, 5]. Большинство исследователей считает, что причина различий заключается в характере распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях глубиной до нескольких микрон.

В настоящей работе изучалось напряжённое состояние в фазах FeB и Fe₂B при электролизном борировании стальных образцов. А также рассмотрена математическая модель, описывающая динамику роста боридных слоев (рис. 1), с целью разработки оптимальных составов насыщающих сред и, соответственно, максимально эффективных технологических режимов.

Для разработки оптимальных составов насыщающих сред и, соответственно, максимально эффективных технологических режимов следует выявить наиболее вероятные механизмы протекания процессов на всех рассматриваемых стадиях с выделением основного лимитирующего звена и последующего описания кинетики зарождения и формирования боросодержащих покрытий. При исследовании механизмов формирования диффузионных слоев необходимо установить направление роста боридных игл по отношению к насыщаемой поверхности, перемещение межфазных границ, изменение концентрации напряжений, фазовый состав. В дальнейшем в совокупности это позволит построить модельную схему электролизного борирования, описывающую механизмы формирования и распределения фаз в диффузионной зоне.

При определенных допущениях распределения концентраций бора C_1 (в фазе FeB) и C_2 (в фазе Fe₂B) должны удовлетворять уравнениям

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2}, \quad \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial Z^2}, \quad (1)$$

где D_1, D_2 – коэффициенты диффузии бора в фазах FeB и Fe₂B соответственно.

Запишем граничные условия задачи:

$$Z = 0: C_1 = C_{1H};$$

при

$$Z = h_1(t): C_1 = C_{1K}; C_1 = C_{2H};$$

$$J_1 = J_2 + k_1 \frac{dh_1}{dt};$$

при

$$Z = h_1(t) + h_2(t): C_2 = C_{2K}, \quad (2)$$

где k_1, k_2 – принимаемые в качестве постоянных величин параметры, характеризующие интенсивность процесса фазового преобразования соответственно на границах «FeB – Fe₂B» и «Fe₂B – Fe».

После двойного интегрирования и последующих преобразований получены зависимости концентраций бора в фазах FeB и Fe₂B:

$$\begin{cases} C_1(t, Z) = C_{1H} - (C_{1H} - C_{1K}) \frac{z}{h_1(t)}; \\ C_2(t, Z) = C_{2H} - (C_{2H} - C_{2K}) \frac{(h_1(t) - z)}{h_2(t)}. \end{cases} \quad (3)$$

Полученные зависимости позволяют рассчитать искомые концентрации со сравнительно небольшими погрешностями (3–5 %).

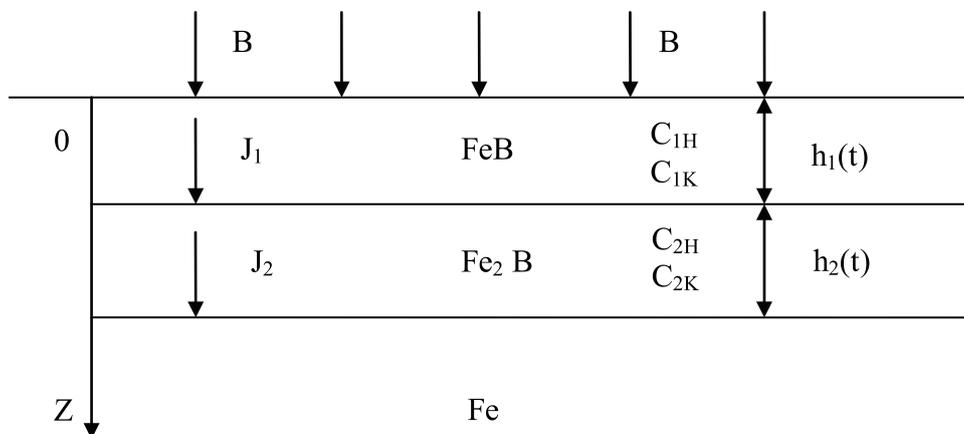


Рис. 1. Схема роста боридных слоев

Для определения зависимостей $h_1(t)$ и $h_2(t)$ воспользуемся граничным условием (2) и с учетом (3) получим

$$D_1 \frac{(C_{1H} - C_{1K})}{h_1(t)} = D_2 \frac{(C_{2H} - C_{2K})}{h_2(t)} + k_1 \frac{dh_1}{dt}. \quad (4)$$

Решение уравнения будем искать в виде

$$h_1(t) = \beta_1 \sqrt{t}, \quad h_2(t) = \beta_2 \sqrt{t}; \quad (5)$$

где

$$\beta_1 = -\frac{D_2(C_{2H} - C_{2K})}{k_1 \beta_2} + \sqrt{\left(\frac{D_2(C_{2H} - C_{2K})}{k_1 \beta_2}\right)^2 + \frac{2D_1(C_{1H} - C_{1K})}{k_1}},$$

$$\beta_2 = \sqrt{\frac{2D_2(C_{2H} - C_{2K})}{k_2}}.$$

Если полагать, что известно соотношение

$$q = \frac{h_1(t)}{h_2(t)} = \frac{\beta_1}{\beta_2}$$

толщин слоев FeV и Fe₂V, можно получить выражение, устанавливающее связь между соотношениями констант процесса k_1/k_2 и D_1/D_2 :

$$q = -\frac{D_2(C_{2H} - C_{2K})}{k_1 \beta_2^2} + \sqrt{\left(\frac{D_2(C_{2H} - C_{2K})}{k_1 \beta_2^2}\right)^2 + \frac{2D_1(C_{1H} - C_{1K})}{k_1 \beta_2^2}}. \quad (9)$$

Или после некоторых преобразований получаем

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{1}{q^2} \left\{ \frac{D_1(C_{1H} - C_{1K})}{D_2(C_{2H} - C_{2K})} - q \right\}. \quad (10)$$

Последнее соотношение было эффективно использовано при расчетах кинетики формирования боридных фаз на железе и его сплавах.

С учетом вышесказанного далее рассмотрен процесс борирования реальных образцов из стали 45.

Образцы из стали 45 насыщались в расплаве борсодержащей среды (бура Na₂B₄O₄ + 20%NaF) в графитовом электролизе Pb при температуре 900 °С. Электролиз проводился в две стадии. На стадии I электролиз проводился при плотности тока на катоде (0,07...0,09) А/см² в течение 10 мин. На II стадии плотность тока плавно снижалась до нуля в течение (1,5...2) часов.

Установлено, что формирование покрытия происходит за счет одновременного массопереноса бора и железа во всех фазах системы [2].

В результате борирования стали 45 глубина боридного слоя составляла (120...125) мкм. Часть образцов после борирования подвергалась диффузионному отжигу при 850 °С в течение 1 часа в среде диссоциированного аммиака. После насыщения или отжига образцы либо нормализовались, либо закаливались в масле.

В результате борирования стали марки 45 по предлагаемому режиму количество фазы Fe₂V составило 90%, фазы FeV – 10%.

Металлографический анализ проводился с помощью микроскопа МИМ-8 (x280). На рис. 2 представлена микроструктура борированного слоя и переходной зоны с крупнозернистой структурой на стали 45 после электролиза при 850 °С.

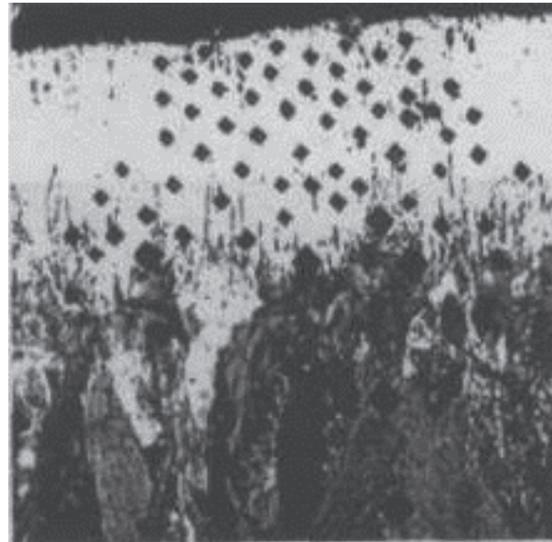


Рис. 2 Микроструктура стали 45 после электролизного борирования. Примечание. (x280)

При этом выявлена зона боридов железа FeV с микротвердостью (20,6...22,5) ГПа. Микротвердость зоны Fe₂V составляла (14,7...15,7) ГПа.

Бор при высоких температурах, диффундируя в металл на определенную глубину, образует на поверхности ромбический борид железа FeV – зона сплошных боридов, далее твердый раствор бора в железе – переходная зона [6]. Сплошной боридный слой имеет двухфазное строение (FeV + Fe₂V); борид FeV расположен в поверхностной части зоны сплошных боридов, Fe₂V формируется у ее основы. Оба бориды имеют игольчатое строение с присутствием между иглами новой фазы, обогащенной углеро-

дом $Fe_2B(C_xV)$. Это обусловлено тем, что при электролизном борировании сталей углерод не растворяется в образующихся боридах железа, а оттесняется с поверхности вглубь металла, вызывая науглероживание промежуточной зоны – подслоя. Эта зона имеет небольшую толщину, и уже на глубине 0,5 мм перераспределение элементов не наблюдается.

Толщина борированного слоя составляет около 0,15 мм.

В образующемся диффузионном слое (рис. 3), состоящем последовательно от поверхности либо из боридов железа FeB , Fe_2B твердого раствора бора в железе, либо из боридов железа Fe_2B и твердого раствора, возникает поле остаточных напряжений. Причины, приводящие к этому, следующие:

1) невязка элементарных ячеек [1] боридов – фаза FeB имеет орторомбическую решетку, фаза Fe_2B – тетрагональную. Кроме того, атомы бора, растворенные в каждой из фаз с градиентом концентрации по глубине, неодинаково искажают структуру каждой из фаз;

2) различие в удельных объемах фаз;

3) наличие преимущественной ориентации хотя бы у одной из фаз;

4) существенные различия в коэффициентах термического расширения [7]. Учитывая иглообразный вид кристаллитов каждой из боридных фаз, можно ожидать наличия сложного напряженного состояния на межфазной границе и вблизи нее. Эти напряжения не могут быть устранены никаким отжигом;

5) «закалочные» напряжения, величина и знак которых зависит как от прочностных и теплофизических характеристик обеих фаз и основного металла, так и от толщины слоя каждой из фаз;

6) различие в модулях упругости FeB и Fe_2B [8] должно приводить к скачку на-

пряжений на границе фаз, а разные коэффициенты Пуассона – к появлению компоненты главных напряжений, перпендикулярной поверхности образца, в результате чего напряженное состояние в приповерхностных слоях становится объемным.

В этих условиях аналитические методы описания напряженного состояния в поверхностных слоях не являются достаточно надежными. Применяемые рентгеновские и механические способы тензометрирования, требующие разрушения изделий, исходят из предположения плоского напряженного состояния, эти методы непригодны, так как послойное удаление материала образца приводит к неучитываемому перераспределению напряжений в оставшейся части. При этом на новой свободной поверхности компонента главных напряжений σ_3 (вертикальная составляющая, действующая на элементарные площадки, параллельные поверхности образца) всегда равна нулю.

Мы использовали рентгенографическую методику [1] для изучения количественного фазового анализа, позволяющую определять начальные участки эпюр всех компонент главных напряжений, в том числе и при наличии значительных градиентов напряжений по глубине, без разрушения изделий.

Эксперимент проводили на дифрактометре ДРОН-3. При дифракции от плоскостей (322) для фазы FeB и (413) для фазы Fe_2B излучение $K_{\alpha}Co$ позволяет с достоверностью получать эпюры напряжений глубины 35 мкм от поверхности; при дифракции от плоскостей (322) для фазы Fe_2B излучение $K_{\alpha}Fe$ – до 25 мкм от поверхности. Углы дифракции для каждой из фаз в ненапряженном состоянии получены при съемках специально приготовленных порошков соответствующих фаз.

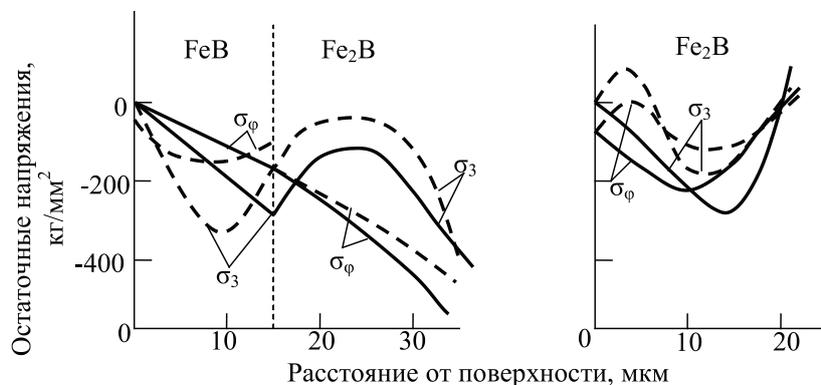


Рис. 3. Распределение напряжений в фазах FeB и Fe_2B : а – борирование при $850^{\circ}C$, 2 ч; б – борирование при $850^{\circ}C$, 2 ч; отжиг при $850^{\circ}C$, 1 ч; сплошные кривые – закалка; штрих-пунктирные – нормализация

Обнаружено, что экспериментальная зависимость $2\Theta_{\psi,\phi} = f(\sin^2 \psi)$ для каждой из фаз не является линейной. Это свидетельствует о наличии сложного напряженного состояния в поверхностных слоях. Эпюры напряжений рассчитывали по стандартной программе «построение парного уравнения регрессии» на ПЭВМ. Вычисленная по методу наименьших квадратов погрешность в значениях напряжений оказалась равной ± 2 кг/мм² в слоях, прилегающих к поверхности, и ± 13 кг/мм² – в глубинных слоях.

На рис. 3 видно, что боридные фазы FeB и Fe₂B находятся в объемном напряженном состоянии со значительными градиентами напряжений по глубине. Так как главные напряжения σ_1 и σ_2 при диффузионных процессах равны между собой и плоскость, в которой они лежат, параллельна поверхности образца, то они равны азимутальным напряжениям σ_ϕ . На межфазовой границе наблюдается скачок напряжений, о причинах которого сказано выше. Характер распределения напряжений в большей степени зависит от режима борирования (наличие одной или двух боридных фаз в поверхностном слое), чем от термообработки после борирования.

Неправильно выбранные режимы при борировании стальных изделий могут приводить к появлению трещин, проходящих перпендикулярно поверхности через обе боридные фазы, из-за больших растягивающих азимутальных напряжений, а также трещин, параллельных поверхности образца на межфазной границе [8], из-за больших растягивающих напряжений σ_3 , что приводит к откалыванию поверхностей фазы FeB.

В результате борирования указанным выше способом улучшилась чистота поверхности, возросла сопротивляемость разрушению под действием динамических нагрузок за счет уменьшения содержания высококарбидной фазы.

Таким образом, применение неразрушающего метода исследования напряженного состояния в поверхностных слоях изделий является эффективным средством контроля при химико-термической обработке.

Список литературы

1. Афанасьев А.А. Особенности электролитного борирования и диффузионных боридных покрытий [Текст] / А.А. Афанасьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 1. – С. 33–40.
2. Борсяков А.С. Теоретическое обоснование кинетики формирования диффузионных боридных покрытий на железе [Текст] / А.С. Борсяков, В.Н. Гадалов, О.Н. Болдырева // Материалы и упрочняющие технологии. – 2005. – С. 95–97.
3. Васильев Д.М. Методика рентгенографического определения остаточных напряжений [Текст] / Д.М. Васильев, А.И. Мелькер, В.В. Трофимов // Заводская лаборатория. – 1967. – Т. 33, № 12. – С. 1539–1541.
4. Гадалов В.Н. Диффузионные боридные покрытия на железе, сталях и сплавах (с альбомом фотографий) [Текст] / В.Н. Гадалов, А.С. Борсяков, В.Г. Сальников, Б.Н. Квашнин, [и др.]. Монография. – Курск, 2012. – 146 с. – (Наука).
5. Гадалов В.Н. Электролитические боридные покрытия с добавками окислов Cr₂O₃, ZrO₂, Ta₂O₅ / В.Н. Гадалов, И.В. Ворначева, С.В. Ковалев, Г.М. Журавлев, Т.Н. Розина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 10. – С. 28–30.
6. Гуревич Б.Г. Зависимость усталостной прочности электролитноборируемой стали на характер распределения напряжения [Текст] / Б.Г. Гуревич, В.А. Пирогова // Физико-химическая механика материалов. – 1967. – Т. 3, № 6. – С. 693–695.
7. Ляхович Л.С. Определение модулей упругости боридных покрытий [Текст] / Л.С. Ляхович, А.Я. Кулик // Заводская лаборатория. – 1978. – Т. 38, № 8. – С. 981–984.
8. Риле М. Причины образования трещин в борированных сталях / М. Риле // МиТОМ. – 1974. – № 10. – С. 20–21.