

PACS: 62.20.F, 63.30.-h

Н.Ю. Филоненко, Л.И. Федоренкова, И.М. Спиридонова

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИФфуЗИЮ БОРА В СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОМ СПЛАВЕ

Днепропетровский национальный университет
ул. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49050, Украина
E-mail: lubaf@dars.dp.ua

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2009 года

Изучено влияние предварительной статической и ударно-волновой пластической деформации на диффузию бора в среднелегированной стали. Показано, что ускорение диффузионных процессов зависит от интенсивности предварительного деформационного воздействия.

Ключевые слова: предварительная статическая деформация, ударно-волновая пластическая деформация, диффузия бора, среднелегированная сталь, зернограничная диффузия, объемная диффузия

В последние годы особый интерес вызывают работы, связанные с исследованием влияния деформационного воздействия [1–4], в частности высокоскоростной деформации на диффузионные процессы [5]. В одних из них указывается на уменьшение диффузионной подвижности насыщающего элемента после предварительной холодной деформации [1,2], в других – показывается ускоряющее действие деформации на формирование диффузионного слоя [3,4]. В обоих случаях бесспорным является то, что предварительная обработка металла влияет на параметры насыщения, ускоряя или замедляя их в зависимости от условий деформационного воздействия. Представляет интерес, каким образом условия деформации влияют на процесс диффузии некоторых элементов. В данной работе изучали влияние предварительной статической и ударно-волновой пластической деформации на диффузию бора в среднелегированной стали.

Исследование проводили на образцах из стали 45, которые предварительно:

- 1) отжигали при температуре 1173 К в течение 5 h;
- 2) подвергали деформации сжатия при температуре 298 К со степенями деформации 20 и 40%;
- 3) обрабатывали взрывом при скорости взрывной волны 353 m/s, времени прохождения ударной волны $6.6 \cdot 10^6$ s, давлении при взрыве 7.7 GPa.

Обработанные указанными способами образцы насыщали бором в твердом карбюризаторе с добавкой карбида бора в течение 4 h при температуре 1223 К.

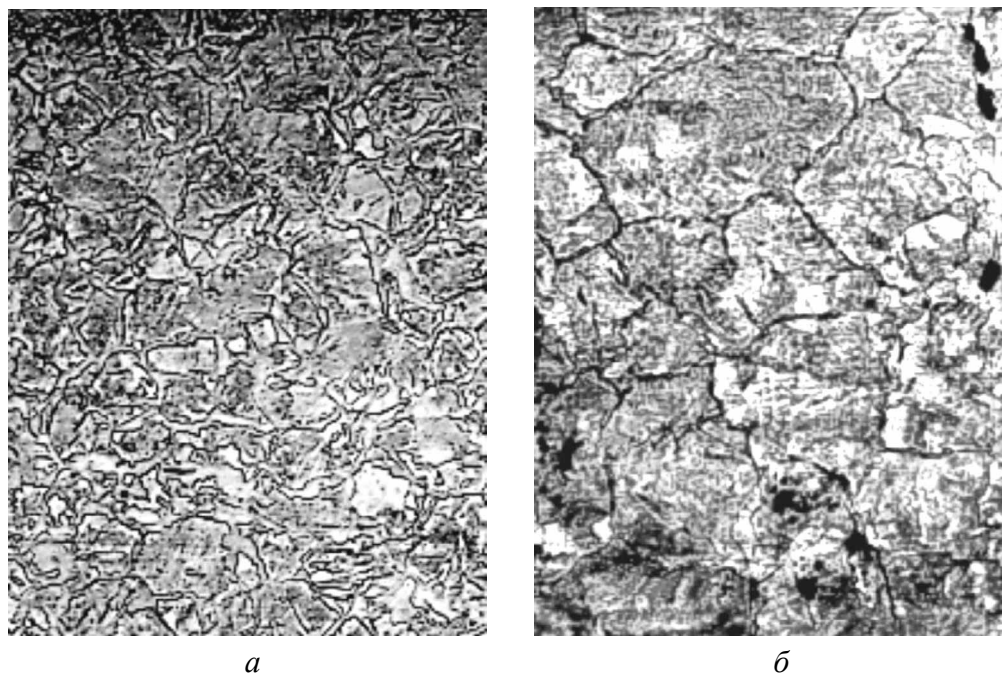


Рис. 1. Микроструктура поверхности стали 45: *а* – отожженной, *б* – после высокоскоростной деформации, $\times 100$

Исследование структуры и свойств поверхности обработанных образцов проводили методами металлографического, послойного спектрального [6], дюраметрического и рентгеноструктурного анализов, а также с помощью электронного растрового микроанализатора РЭММА 102-02.

Как видно на рис. 1, *а*, микроструктура стали в отожженном состоянии представляет перлитно-ферритную смесь. После высокоскоростной обработки (рис. 1, *б*) микроструктура стали на глубине до 500–550 μm от поверхности характеризуется дроблением зерен, разномерностью, утонением цементитной сетки по границам зерен, увеличением в микроструктуре ферритной составляющей. Кроме этого, на указанной глубине наблюдается изменение микротвердости от 450 до 285 МПа.

Предварительная холодная пластическая деформация приводит к измельчению зерна в поверхностной зоне и увеличению микротвердости. На рис. 2 показано изменение содержания бора и микротвердости по глубине диффузионной зоны при насыщении поверхности бором. Из графиков видно, что деформационное воздействие на сталь 45 увеличивает глубину диффузионного слоя и микротвердость, что положительно сказывается на прочностных свойствах стали. Причем при высокоскоростной деформации показатели по глубине и микротвердости больше, чем при холодной пластической деформации. То есть высокоскоростная деформация оказывает более интенсивное воздействие на поверхность металла, стимулируя ускорение диффузионных процессов за счет увеличения дефектов, напряжений в структуре, развития пластических сдвигов в микрообъемах. По данным работ [7,8], при воздействии высокоскоростной деформации происходит увеличение плотности дислокаций до 10^{12} – 10^{13} cm^{-2} .

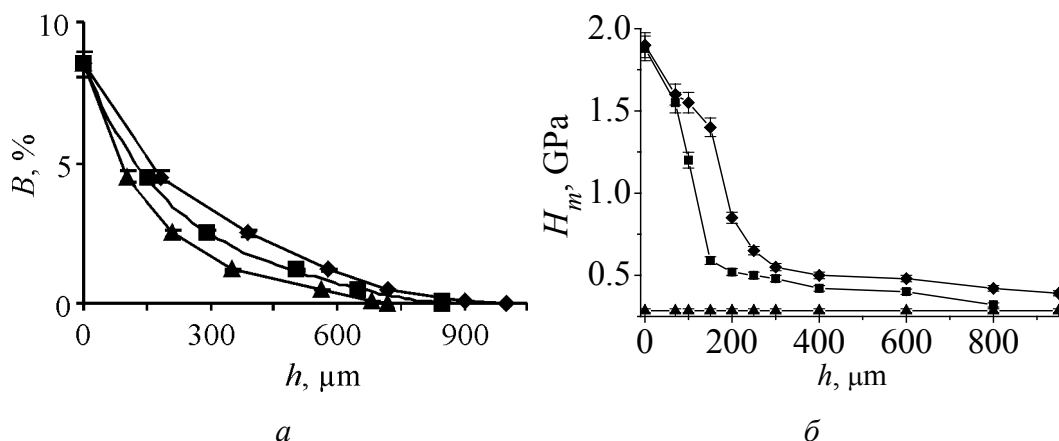


Рис. 2. Изменение по глубине диффузионной зоны: *а* – содержания бора, *б* – микротвердости для борированных образцов из стали 45, предварительно подвергнутых: ▲ – отжигу, ■ – холодной пластической деформации, ◆ – обработке взрывом (прямое действие ударной волны)

Результаты влияния условий предварительной обработки на глубину диффузионной зоны приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что чем интенсивнее деформационное воздействие на сталь, тем больше глубина диффузионного слоя после борирования. Причем этот факт характерен как для высокоскоростной деформации, так и для холодной пластической деформации (величина деформации в %).

Таблица 1

Зависимость глубины диффузионной зоны от условий предварительной обработки

| Предварительная обработка | Величина деформации, % | Глубина слоя, μm | |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| | | боридного | диффузионного |
| Отжиг | – | 136.4 | 761.5 |
| Холодная пластическая деформация | 20 | 176.3 | 950.2 |
| | 40 | 184.6 | 978.3 |
| Высокоскоростная деформация | Прямое действие ударной волны | 185.2 | 1050.5 |

В зоне влияния бора наблюдали образование бороцементитных включений. В сплаве, прошедшем предварительную пластическую деформацию, включения располагались преимущественно по границам ферритных зерен, а после предварительной высокоскоростной деформации – и в объеме зерна. Вероятно, в среднеуглеродистом сплаве после предварительного деформационного воздействия различной интенсивности диффузия бора осуществляется не только по границам зерен аустенита, но и по объему зерна.

Для понимания полученного эффекта ускорения диффузионного процесса при насыщении стали бором следует определить, какие механизмы диффузии могут быть задействованы в данном случае.

Как известно, диффузия может происходить по трем режимам: A , B , C [9]. Отток диффузанта от границы в объем зерна в режиме диффузии типа C отсутствует, основной диффузионный массоперенос осуществляется по границам зерен – объемная диффузия «заморожена» (диффузионный путь меньше 1 нм); в режиме типа B – минимален, в режиме A – максимален. В случае C глубина проникновения диффузанта по границе зерна в объем поликристалла будет определяться лишь параметрами зернограничной диффузии, а в случае B – параметрами как зернограничной, так и объемной диффузии, в случае A – параметрами объемной диффузии. В результате насыщения бором поверхности образцов, прошедших отжиг, предварительную холодную пластическую и высокоскоростную деформацию, бор диффундирует и по границам зерен, и по объему зерна, что соответствует кинетике режима диффузии типа B . Учитывая это, обозначим через \bar{c} усредненную концентрацию бора по глубине диффузионной зоны, которая является суммой концентраций объемной c_1 и граничной c_2 диффузии [10]:

$$\bar{c} = c_1 + c_2. \quad (1)$$

Для определения вклада объемной диффузии бора используем соотношение

$$c_1 = c_0 \operatorname{erf} c \frac{z}{2(Dt)^{1/2}}, \quad (2)$$

где z – глубина слоя, D – коэффициент объемной диффузии, t – время насыщения.

Тангенс угла наклона прямой, определенный из графика $\ln B = f(h)$, позволяет определить величину δD_b из выражения

$$\delta D_b = 2(D/t)^{1/2} \left(-\partial \ln \bar{c} / \partial z^n \right)^{-2/n} \left[-\partial \ln c / \partial (\eta \bar{\beta}^{-1/2})^n \right]^{2/n}, \quad (3)$$

где $\beta = \frac{\delta D_b}{2D^{3/2}t^{1/2}}$, $\eta_0 = z/(Dt)^{1/2}$ – безразмерные переменные, δD_b – произведение коэффициента граничной диффузии на ширину границы.

Из-за отсутствия прямых экспериментальных данных по ширине границы обычно определяют не коэффициент зернограничной диффузии D_b , а произведение δD_b , входящее в уравнение диффузии. Для приближенной оценки величины D_b было принято наиболее часто встречающееся в литературе значение ширины границы $\delta = 0.01 \mu\text{m}$ [11].

В табл. 2 представлены результаты расчета отношения D_b/D . Из таблицы видно, что по сравнению с предварительно отожженным состоянием среднеуглеродистого сплава отношение D_b/D при предварительной холодной пластической деформации уменьшается на порядок, а при высокоскоростной деформации – на 2–3 порядка. Последнее обстоятельство является следствием того, что при высокоскоростной деформации происходит дробление зерна, а следовательно, увеличение длины границ, что делает энергетически выгодной и объемную диффузию. В данном случае можно сказать, что степень дробления зерна определяет тип диффузии и величину отношения D_b/D .

Таблица 2

Результаты расчета отношения коэффициента зернограничной диффузии к коэффициенту объемной диффузии бора

| Предварительная обработка | Величина деформации, % | D_b/D |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Отжиг | – | $2.17 \cdot 10^4$ |
| Холодная пластическая деформация | 20 | $4.36 \cdot 10^3$ |
| | 40 | $4.87 \cdot 10^3$ |
| Высокоскоростная деформация | Прямое действие ударной волны | $1.45 \cdot 10^2$ |

Предварительная холодная пластическая деформация способствует увеличению глубины диффузионного слоя при насыщении бором среднеуглеродистого сплава, особенно при степени деформации 40% (см. табл.1). Это связано прежде всего с увеличением дефектности структуры поверхностного слоя. Влияние пластической деформации на процесс диффузии бора можно объяснить взаимодействием атомов бора с дефектами, наследованными из исходной деформированной структуры. В микроструктуре образцов, предварительно подвергнутых пластической деформации, борцементитные включения располагаются не только по границам, но и в объеме зерна, что является результатом изменения диффузионного пути бора при насыщении поверхности. Следовательно, увеличение диффузии бора идет не только по границам зерен, но и по дислокациям, образовавшимся после предварительной деформации, что приводит к росту коэффициента объемной диффузии бора (табл. 2).

Таким образом, для предварительно отожженных образцов преобладает зернограничная диффузия, а для образцов, подвергнутых деформационному воздействию, доля объемной диффузии возрастает с увеличением интенсивности этого воздействия.

Выводы

1. Деформационное воздействие на сталь 45 увеличивает глубину диффузионного слоя и микротвердость образца, что положительно сказывается на прочностных свойствах стали. Причем при высокоскоростной деформации показатели по глубине и микротвердости выше, чем при холодной пластической деформации.

2. В результате насыщения бором поверхности образца, прошедшего предварительную высокоскоростную деформацию, бор диффундирует и по границам зерен, и по объему зерна, что соответствует кинетике режима диффузии типа *B*.

3. Результаты расчета отношения коэффициента зернограничной диффузии к коэффициенту объемной диффузии бора показали, что наличие предварительной деформации увеличивает зернограничную и объемную диффузию бора. Причем предварительный отжиг способствует преобладанию зернограничной диффузии над объемной, холодная пластическая деформация

приводит к увеличению объемной диффузии, а высокоскоростная деформация – к росту как зернограницной, так и объемной диффузии.

1. М.А. Матосян, В.Т. Борисов, В.М. Голиков, ФММ 4, 824 (1970).
2. И.Н. Кидин, Г.В. Щербединский, В.И. Андрюшечкин, Металловедение и термическая обработка № 12, 26 (1981).
3. П.Л. Грузин, Ю.Г. Дорофеев, В.В. Мураль, К.К. Ламков, ФММ 3, 668 (1971).
4. Ю.М. Лахтин, В.Д. Кальнер, В.К. Седуков, Т.А. Смирнова, Металловедение и термическая обработка № 12, 22 (1971).
5. Р.П. Дидык, В.А. Безрукавая, Л.В. Грязнова, А.Г. Лисняк, Металлофиз. новейшие технол. 30, 1289 (2008).
6. С.В. Твердохлебова, И.М. Спиридонова, А.М. Бондаренко, Заводская лаборатория № 11, 46 (1990).
7. А.А. Дерibas, Физика упрочнения и сварки взрывом, Наука, Новосибирск (1980).
8. В.А. Симоненко, Н.А. Скоркин, В.В. Башуров, Физика горения и взрыва 27, № 4, 46 (1991).
9. И. Каур, В. Густ, Диффузия по границам зерен и фаз, Машиностроение, Москва (1991).
10. М.А. Криштал, Механизм диффузии в железных сплавах, Металлургия, Москва (1972).
11. Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лапто, Борсодержащие стали и сплавы, Металлургия, Москва (1986).

Н.Ю. Філоненко, Л.І. Федоренкова, І.М. Спиридонова

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ДІЇ НА ДИФУЗИЮ БОРА В СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВОМУ СПЛАВІ

Вивчено вплив статичної та ударно-хвильової пластичної деформації на дифузію бора в середньолегованій сталі. Показано, що прискорення дифузійних процесів залежить від інтенсивної попередньої деформаційної дії.

Ключові слова: попередня статична деформація, ударно-хвильова пластична деформація, дифузія бора, середньолегована сталь, зернограницна дифузія, об'ємна дифузія

N.Y. Filonenko, L.I. Fedorenkova, I.M. Spiridonova

DEFORMATION EFFECT ON BORON DIFFUSION IN MEDIUM-CARBON ALLOY

Effect of preliminary static and shock-wave plastic deformation on boron diffusion in medium-carbon steel is investigated. It is shown that diffusion acceleration depends on intensity of deformation.

Keywords: preliminary static deformation, shock-wave plastic deformation, boron diffusion, medium-carbon steel, grain boundary diffusion, volume diffusion

Fig. 1. Microstructure of steel 45 surface: *a* – annealed, *b* – after high-speed deformation, $\times 100$

Fig. 2. Change of: *a* – boron content, *b* – microhardness along diffusion depth for borated specimens of steel 45 pretreatment: \blacktriangle – annealing, \blacksquare – cold plastic deformation, \blacklozenge – detonation treatment (direct impact of shock wave)