

Н. Ю. ФИЛОНЕНКО (УДХТУ, Днепропетровск), С. Б. ПИЛЯЕВА (ДНУ им. О. Гончара, Днепропетровск), С.И. КУЛИКОВ (УДХТУ, Днепропетровск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕСС ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ОДНОВРЕМЕННО УГЛЕРОДОМ И БОРОМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И БОРСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ

Роботу присвячено вивченню впливу попередньої холодної пластичної деформації зі ступенем деформації 0...40 % на процес дифузійного насичення бором і вуглецем низьковуглецевих та бормістячих сплавів на залізній основі. Встановлено, що попередня холодна пластична деформація низьковуглецевого сплаву зі ступенем деформації 20 % при температурі 750 °С сприяє збільшенню глибини дифузійної зони на 25 % та збільшенню мікротвердості перлітного шару на 20 %.

Ключові слова: низьковуглецеві та бормістячі сплави на залізній основі, попередня холодна пластична деформація, глибина дифузійної зони, мікротвердість перлітного шару, дифузійне насичення

Работа посвящена изучению влияния предварительной холодной пластической деформации со степенью деформации 0...40 % на процесс диффузионного насыщения бором и углеродом низкоуглеродистых и борсодержащих сплавов на железной основе. Установлено, что предварительная холодная пластическая деформация низкоуглеродистого сплава со степенью деформации 20 % при температуре 750 °С способствует увеличению глубины диффузионной зоны на 25 % и увеличению микротвердости перлитного слоя на 20 %.

Ключевые слова: низкоуглеродистые и борсодержащие сплавы на железной основе, предварительная холодная пластическая деформация, глубина диффузионной зоны, микротвердость перлитного слоя, диффузионное насыщение

This work is devoted to the study of influence of cold prestrain with degree of deformation within the range 0...40 % on diffusion saturation with boron and carbon for low-carbon and boron steels. It is determined that the plastic prestrain with degree of deformation 20 % at temperature 750 °C for the low-carbon steel promote increasing of boron-cementation layer thickness by 25 % and microhardness of perlite layer by 20 %.

Keywords: low-carbon and boron steels, plastic prestrain, boron-cementation layer thickness, microhardness of perlite layer, diffusion saturation

Диффузійні процеси в сплавах проведених попередньої деформації представляють інтерес, оскільки вони описують процеси в умовах, при яких сплав знаходиться в неравновесному стані. Вплив ступеня попередньої холодної пластичної деформації на процес дифузійного насичення сталей досліджено в роботах [1, 2]. Показано, що холодна пластична деформація прискорює масоперенос вуглецю. Крім того, що присутність бору в сталях і в середовищах для цементации сприяє прискоренню процесів науглероживання [3, 4].

В даній роботі вивчали вплив ступеня попередньої холодної пластичної деформації в низкоуглеродистих і борсодержащих сплавах на процес дифузійного насичення поверхні одночасно вуглецем і бором.

Дослідження проводили на зразках залізньоуглеродистого сплаву з масовою долей вугле-

рода 0,25 % і залізоборуглеродистом сплаві з масовою долей вуглецю 0,25 % і бору 0,035 %.

Досліджувані сплави попередньо обробляли за наступними режимами: віджигали при температурі 900 °С впродовж 5 годин; підвергали попередньої холодної пластичної деформації при температурі 25 °С і ступенях деформації 0...40 %.

Після попередньої обробки здійснювали: насичення поверхні зразків вуглецем і бором при температурі 750 °С в середовищі з деревноугольного карбюратора, карбіда бору і фтористого активатора впродовж 4 годин.

Мікроструктуру сплавів досліджували на скануючому електронному мікроскопі з мікроаналізатором JSM-6490 series і на мікроскопі «Неофот-21». Мікромеханічні характеристики сплавів вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Фазовий склад сплавів, плот-

ность дислокаций определяли с помощью рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-3 в $Fe_{K\alpha}$ -излучении. Послойный спектральный анализ проводили по методике [5].

Микроструктура исходного состояния представляла ферритно-перлитную смесь. В результате холодной пластической деформации со степенью 20 % в низкоуглеродистом сплаве происходит незначительное дробление перлитных пластин. В борсодержащем сплаве перлитная область с разной степенью дисперсности.

Проведено определение плотности дислокаций низкоуглеродистого и борсодержащего сплавов для определения их на последующее диффузионное насыщение в зависимости от степени предварительной деформации.

Исследование плотности дислокаций низкоуглеродистого и борсодержащего сплавов показало, что в борсодержащем сплаве плотность дислокаций в феррите увеличивается менее интенсивно, чем в низкоуглеродистом (рис. 1) с увеличением степени пластической деформации.

На рис. 2 представлена зависимость глубины диффузионной зоны от степени предварительной холодной пластической деформации. Как видно из рис. 2, *а*, предварительная холодная пластическая деформация низкоуглероди-

стого сплава способствует диффузии атомов углерода и бора. Причем, максимальная глубина диффузионной зоны наблюдается после предварительной холодной пластической деформации со степенью деформации 20 %.

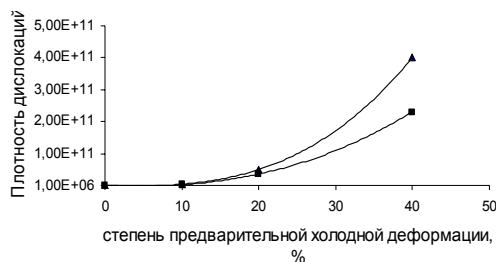


Рис. 1. Зависимость плотности дислокаций в феррите от степени предварительной деформации для: *а*) \blacktriangle – низкоуглеродистого; *б*) \blacksquare – борсодержащего сплава

Дальнейшее увеличение степени предварительной деформации приводит к уменьшению глубины диффузионной зоны. В борсодержащих сплавах, прошедших предварительную холодную пластическую деформацию, наблюдали уменьшение глубины диффузионной зоны с увеличением степени предварительной пластической деформации (рис. 2, *б*).

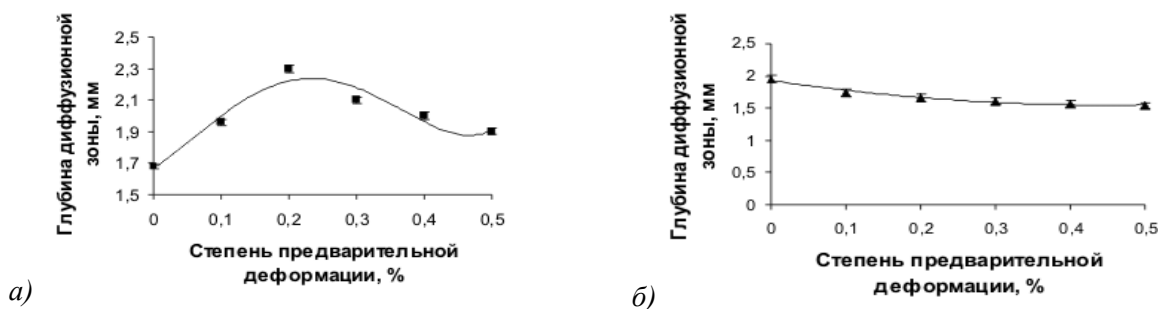


Рис. 2. Зависимость глубины диффузионной зоны бора и углерода от степени предварительной пластической деформации для: *а*) низкоуглеродистого сплава, *б*) борсодержащего сплава

На рис. 3 приведена зависимость микротвердости перлита после бороцементации в перлитной зоне низкоуглеродистого и борсо-

держащего сплавов в зависимости от степени предварительной пластической деформации.

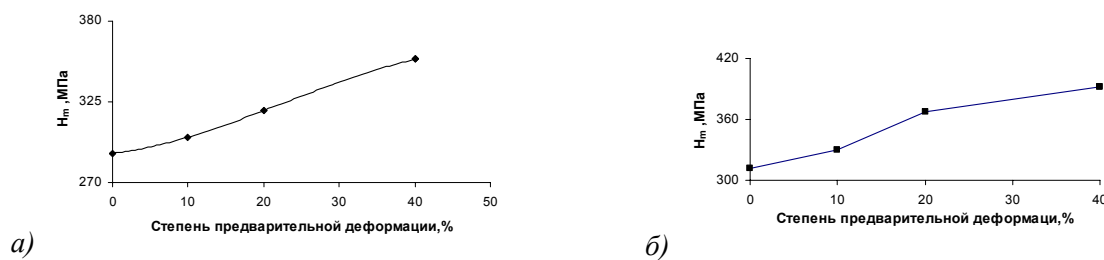


Рис. 3. Зависимость микротвердости перлита на глубине 150 мкм, полученного после бороцементации, от степени предварительной деформации для: *а*) низкоуглеродистого, *б*) борсодержащего сплавов

Микротвердость перлита борцементованного слоя в борсодержащем и в низкоуглеродистом сплавах выше для образцов, предварительно деформированных. Кроме того, борсодержащий сплав имеет большую величину микротвердости перлита в сравнении с низкоуглеродистым при одинаковых условиях обработки.

В результате насыщения поверхности отожженного низкоуглеродистого сплава углеродом и бором образуется перлит с крупными пластинами. По границам зерен присутствуют выделения борцементита.

При насыщении низкоуглеродистого сплава, прошедшего предварительную деформацию, ширина пластин перлита уменьшается, края пластин приобретают округлую форму. Выделение борцементитных частиц происходит не только по границам перлитных зерен, но и в перлите.

При насыщении поверхности отожженного борсодержащего сплава одновременно бором и углеродом происходит образование мелкодисперсного перлита в диффузионной зоне, по границам и в зерне которого присутствуют включения борцементита. Наличие предварительной пластической деформации способствует образованию зернистого перлита в борцементованном слое. При этом количество борцементитных частиц в объеме перлитного зерна увеличивается.

На поверхности борсодержащего сплава после одновременного насыщения углеродом и бором формируется борокарбидный слой, состоящий из кубического борокарбида $Fe_{23}(CB)_6$.

В работе проводили расчет коэффициентов диффузии бора и углерода для процесса одновременного насыщения бором и углеродом поверхности исследуемых сплавов. Для расчета использовали методику, изложенную в работах [6 – 8]. Решение системы дифференциальных уравнений позволяет определить парциальные коэффициенты диффузии углерода и бора:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{11} \frac{\partial C_1}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial C_2}{\partial x} \right);$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{21} \frac{\partial C_1}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial C_2}{\partial x} \right),$$

где D_{11} – коэффициент диффузии углерода; D_{22} – коэффициент диффузии бора под действием собственных градиентов концентрации; D_{12} – коэффициент диффузии углерода под действием градиента концентрации бора, D_{21} – коэффициент диффузии бора под действием градиента концентрации углерода.

Решение данной системы уравнений проводили при следующих граничных и начальных условиях: при борцементации низкоуглеродистого сплава: $C_1(x, 0) = C_{10}$, $C_1(\infty, t) = C_{10}$, где C_{10} – первоначальное содержание углерода в низкоуглеродистом сплаве; при борцементации борсодержащего сплава: $C_2(x, 0) = C_{20}$, $C_2(\infty, t) = C_{20}$, где C_{20} – первоначальное содержание бора в борсодержащем сплаве.

Решение данной системы уравнений осуществляли методом численного анализа. Результаты расчета приведены в табл. 1. Как видно из результатов расчета, приведенных в табл. 1, в низкоуглеродистом сплаве, прошедшем предварительную обработку и борсодержащем сплаве без предварительной деформации присутствие бора в насыщающей среде приводит к увеличению диффузионной подвижности атомов углерода.

Для борсодержащего сплава, прошедшего предварительную холодную пластическую деформацию, число дислокаций меньше, чем в низкоуглеродистом (рис. 1), наблюдается уменьшение диффузионной подвижности атомов углерода, что приводит к уменьшению градиента концентрации атомов углерода, а, следовательно, к уменьшению глубины борцементованного слоя.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициентов диффузии углерода и бора при насыщении поверхности низкоуглеродистого и борсодержащего сплавов, прошедших предварительную обработку

Содержание в сплаве		Предварительная хол. деф. ξ , %	Коэффициенты диффузии, $см^2/с$			
С, %	В, %		D_{11}	D_{12}	D_{21}	D_{22}
0,25	-	отожженный	$3,64 \cdot 10^{-7}$	$4,09 \cdot 10^{-6}$	$6,07 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$
		20	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$8,33 \cdot 10^{-7}$	$3,09 \cdot 10^{-6}$
0,25	0,0035	отожженный	$8,67 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,33 \cdot 10^{-6}$	$8,09 \cdot 10^{-6}$
		20	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$

Результаты расчета (табл. 1) показали, что наибольший вклад диффузии углерода по дефектам структуры в суммарный поток диффузии наблюдается при степени деформации 20 %. Увеличение степени предварительной деформации, с одной стороны, должно приводить к увеличению дефектов структуры, а следовательно, к увеличению диффузионного процесса, а с другой стороны существует оптимальная степень деформации, инициирующая диффузионный процесс. На основе анализа тонкокристаллического строения низкоуглеродистой стали, представленного в работах [9, 10], установлено, что после достижения определенного значения степени пластической деформации в относительно равном распределении дислокаций появляются признаки их немонотонного распределения. Увеличение числа дислокаций приводит к возникновению их криволинейных фрагментов. По всей видимости, дефектная структура, возникающая в результате предварительной холодной пластической деформации в борсодержащем сплаве, менее устойчива в результате нагрева.

При одновременном насыщении бором и углеродом в среде, содержащей карбид бора, наблюдается увеличение глубины диффузионной зоны в 2...2,2 раза по сравнению с цементованным слоем. Предварительная холодная пластическая деформация низкоуглеродистого сплава, проведенная при степени деформации 20 %, также способствует увеличению глубины диффузионной зоны на 25 %.

На основании проведенных исследований разработан способ бороцементации, который позволяет получать более качественные, однородные бороцементированные слои большей толщины, упрочненные дисперсными борокарбидами.

Выводы

1. На основании расчетных и экспериментальных данных показано, что оптимальная степень предварительной холодной пластической деформации, при которой эффективный коэффициент диффузии углерода имеет максимальное значение, соответствует 20 %. При этом глубина диффузионной зоны увеличивается на 25 %. Для борсодержащего сплава наличие предварительной пластической деформации уменьшает коэффициент диффузии углерода и бора.

2. Показано, что в борсодержащем сплаве процесс насыщения поверхности одновременно углеродом и бором более эффективен в отожженном состоянии. Из расчетных и экспери-

ментальных данных следует, что предварительная холодная пластическая деформация уменьшает диффузионную подвижность углерода.

3. Результаты расчета коэффициентов диффузии углерода и бора в низкоуглеродистом сплаве показывают, что присутствие бора в насыщающей среде или в сплаве увеличивает диффузионную подвижность углерода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние предварительной холодной деформации на цементацию стали [Текст] / Ю. М. Лактин [и др.] // *Металловед. и термич. обработка металлов.* – 1971. – № 12. – С. 22-26.
2. Кидин, И. Н. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода в аустените [Текст] / И. Н. Кидин, Г. В. Щербединский, В. И. Андриюшечкин // *Металловед. и термич. обработка.* – 1981. – № 12. – С. 26-28.
3. А. с. СССР № 1352979, кл. С 23 С8/06 [Текст], 1985.
4. Филоненко, Н. Ю. Корисна модель № 38192 С23С 8/06 [Текст] от 25.12.2008 / Н. Ю. Филоненко, И. М. Спиридонова, С. Б. Пиляева. – *Бюл. № 24.*
5. Твердохлебова, С. В. Спектральный анализ борсодержащих сплавов [Текст] / С. В. Твердохлебова, И. М. Спиридонова, А. М. Бондаренко // *Заводская лаборатория.* – 1990. – № 11. – С. 46-49.
6. Криштал, М. А. Многокомпонентная диффузия в металлах [Текст] / М. А. Криштал, А. И. Волков. – М.: *Металлургия*, 1985. – 175 с.
7. Любов, Б. Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах [Текст] / Б. Я. Любов. – М.: *Наука*, 1981. – 295 с.
8. Акимов, Е. Н. Решение задач многокомпонентной диффузии с помощью параллельного алгоритма матричной прогонки [Текст] / Е. Н. Акимов, И. И. Горбачев, В. В. Попов // *Математическое моделирование.* – 2005. – т. 17, № 9. – С. 85-92.
9. Трефилов, В. И. Изменение ячеистой дислокационной структуры и упрочнение при пластической деформации ОЦК металлов [Текст] / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский // *Докл. АН УССР.* – 1985. – № 11. – С. 81-84.
10. Большаков, В. И. Термическое упрочнение и контролируемая прокатка строительных сталей [Текст] / В. И. Большаков. – К.: *УМКВО*, 1991. – 435 с.
11. Holt, D. L. Dislocation cell formation in metals [Text] / D. L. Holt // *J. Appl. Phys.* – 1970. – v. 41. – P. 3197-3202.

Поступила в редколлегию 01.06.2010.

Принята к печати 18.06.2010.