

Н. Ю. ФИЛОНЕНКО (УГХТУ, Днепропетровск), С. Б. ПИЛЯЕВА (ДНУ им. О. Гончара, Днепропетровск)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕСС РАСПАДА ПРИ ОТПУСКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И БОРСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ

В роботі досліджували вплив попередньої деформації на розпад мартенситу у вуглецевих та бормістячих сплавах. Показано, що при малому ступені деформації 7 % як у вуглецевому, так і бормістячому сплавах процес розпаду мартенситу відбувається менш інтенсивно. При розпаді мартенситу бормістячого сплаву утворюється борцементит та ферит. Збільшення ступеня попередньої деформації в бормістячому сплаві сприяє більш рівномірному розподілу борцементитних частинок, що утворилися в результаті розпаду мартенситу.

В работе исследовали влияние предварительной деформации на распад мартенсита в борсодержащем и углеродистом сплаве. Показано, что при малой степени деформации 7 % как в низкоуглеродистом, так и борсодержащем сплавах процесс распада мартенсита происходит менее интенсивно. Продуктами распада мартенсита в борсодержащем сплаве является бороцементит и феррит. Увеличение степени предварительной деформации в борсодержащем сплаве способствует более равномерному распределению бороцементитных частиц, образовавшихся в результате распада мартенсита.

In the paper the influence of preliminary deformation on disintegration of martensite in boron-containing and carbonic alloy is explored. It is shown that at the small degree of deformation (7 per cent) both in low-carbonic and boron-containing alloys the process of martensite disintegration takes place less intensively. The increase of degree of preliminary deformation in a boron-containing alloy is instrumental in more even distribution of boron-cementite particles appearing as a result of martensite disintegration.

Присутствие бора в углеродистых сплавах способствует повышению прокаливаемости и прочности в процессе термообработки. При термообработке предварительно деформированных углеродистых и борсодержащих сталей малоизученными являются процессы формирования структуры при отпуске мартенсита и выделение карбидных и борокарбидных фаз [1 – 3].

В работе исследовали влияние степени предварительной деформации на закалку, отпуск и на процесс выделения карбидных фаз в углеродистом сплаве и борокарбидных фаз в сплаве, микролегированном бором.

Исследования проводили на сплавах с содержанием: углерода 0,4 %; углерода 0,4 % и бора 0,0035 %.

Предварительную холодную пластическую деформацию проводили со степенью деформации 7...40 % при температуре 25 °С. После чего осуществили нагрев под закалку до температуры 900 °С и охлаждали в воде со скоростью охлаждения 40 °С/с. Последующий отпуск проводили при температурах 450 °С, 650 °С в течение 20 часов.

Микроструктуру сплавов исследовали на сканирующем электронном микроскопе с микроанализатором JSM-6490 series и на микроскопе «Неофот-20», микромеханические харак-

теристики определяли на микротвердомере ПМТ-3. Фазовый состав сплавов осуществляли с помощью рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-3 в Fe *ka*-излучении.

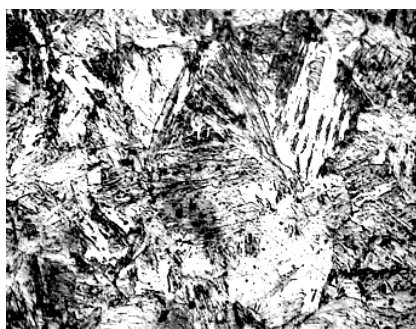
Микроструктура углеродистого и борсодержащего сплава, прошедшего предварительную холодную пластическую деформацию после закалки, приведена на рис. 1.

Результаты исследования зависимости микротвердости мартенсита образцов от степени деформации приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, микролегирование бором сплава способствует повышению микротвердости как деформированного, так и недеформированного сплава.

Мартенсит углеродистого сплава имеет игольчатое строение. Рост игл мартенсита начинается с границы зерна и пронизывает все зерно.

Известно, что в сплаве, содержащем бор, фазовое превращение из аустенита в мартенсит происходит более интенсивно [4 – 6]. В борсодержащем сплаве иглы мартенсита имеют меньшую длину, кроме того, количество остаточного аустенита меньше, чем в углеродистом сплаве. В микроструктуре мартенсита наблюдали мелкодисперсные выделения борокарбидной фазы – не растворившиеся в результате нагрева под закалку.



а



б

Рис. 1. Микроструктура мартенсита поверхностной зоны сплавов после закалки предварительно деформированных при температуре 25 °С со степенью деформации 20 %:  
 а) углеродистого сплава с содержанием С = 0,4 % ,  
 б) – борсодержащего сплава с содержанием С = 0,4 %, В = 0,0035 % (×1000)

Таблица 1

**Зависимость микротвердости мартенсита после предварительной холодной пластической деформации при температуре 25 °С от степени деформации**

Состав		ξ %, степень деформации	H, МПа
С, %	В, %		
0,4	-	0	686,59
		7	698,65
		20	726,02
		40	759,05
0,4	0,0035	0	729,68
		7	732,8
		20	751,4
		40	780,36

В результате отпуска мартенсита после предварительной холодной деформации при температуре 450 °С наблюдается образование тростита в поверхностной зоне углеродистого сплава, в котором мелкодисперсные карбиды расположены в виде прерывистых цепочек (рис. 2, а). С увеличением степени предварительной деформации не только размер карбидов увеличивался (рис. 3, а), но и изменялась их морфология. Если при степени деформации 7 % карбидные частицы располагались в зерне и по границам ферритных областей и имели сферическую форму, то с увеличением степени предварительной деформации до 20 % они наблюдались преимущественно по границам ферритных областей. При степени предварительной деформации 40 % карбидные частицы наблюдались только по границам ферритных областей и имели цилиндрическую форму. Микролегирование сплава бором способствует образо-

ванию тростита с более дисперсной структурой (рис. 2, б). Рентгеноструктурный анализ зафиксировал присутствие борцементита и феррита.

В результате отпуска мартенсита после предварительной холодной пластической деформации 7 % в борсодержащем сплаве наблюдали образование мелкодисперсных борцементитных частиц в объеме ферритных областей. При увеличении степени предварительной деформации до 20 % предварительной деформации закалки и последующего отпуска борсодержащего сплава происходит образование борцементитных частиц, как в объеме ферритных областей, так и по границам зерен. При этом с увеличением степени предварительной холодной пластической деформации размер частиц увеличился. Дальнейшее увеличение степени предварительной пластической деформации наблюдали незначительное увеличение размеров борцементитных частиц.

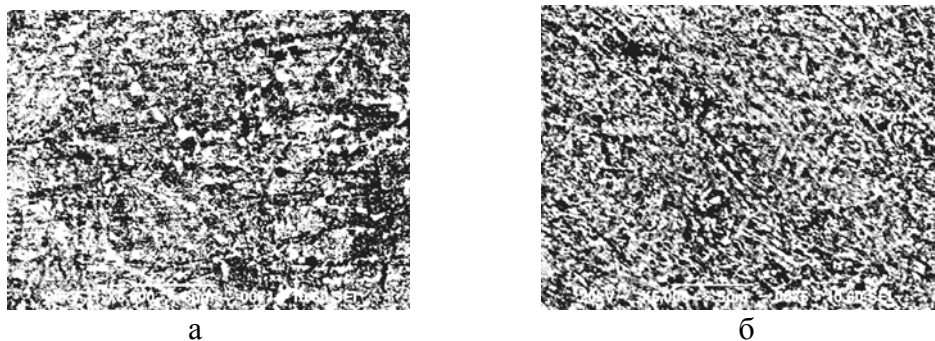


Рис. 2. Микроструктура поверхностной зоны сплавов, предварительно деформированных при температуре 25 °С со степенью 20 % после отпуска мартенсита при температуре 450 °С с содержанием: а) С = 0,4 %; б) С = 0,4 %, В = 0,0035 (x5000)

На рис. 3 приведена зависимость среднего размера карбидов углеродистого сплава и борокарбидов борсодержащего сплава от степени

предварительной деформации после отпуска мартенсита при температуре 450 °С.

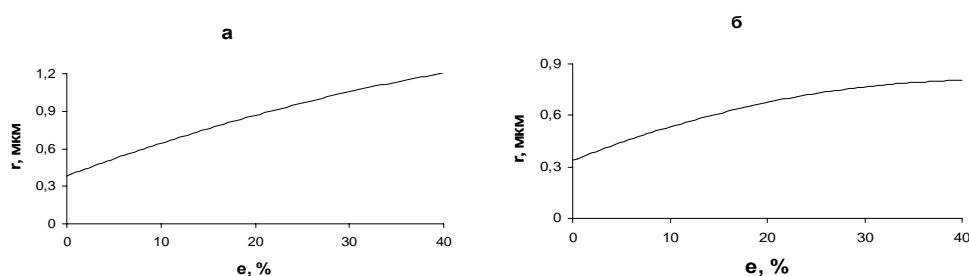


Рис. 3. Зависимость среднего размера включений от степени предварительной холодной пластической деформации: а) карбидов в углеродистом сплаве, б) борокарбидов в борсодержащем сплаве

В табл. 2 приведена зависимость микротвердости зернистого перлита от степени предварительной холодной деформации угле-

родистого и борсодержащего сплава после отпуска при температуре 650 °С.

Таблица 2

**Зависимость микротвердости зернистого перлита после отпуска при температуре 650 °С углеродистого и борсодержащего сплава**

Состав		ξ %, степень деформации	H <sub>μ</sub> , МПа
С, %	В, %		
0,4	-	0	260,3
		7	286,5
		20	231,6
		40	238,2
0,4	0,0035	0	271,3
		7	295,3
		20	231,2
		40	222,1

В результате отпуска мартенсита при температуре 650 °С углеродистого сплава, не прошедшего предварительную деформацию, наблюдали образование сорбитообразного перли-

та. Высокотемпературный отпуск углеродистого сплава, прошедшего предварительную холодную деформацию со степенью 7 %, приводит к образованию тростита. Увеличение

степени предварительной деформации до 20 % сопровождается увеличением скорости распада мартенсита и образованию зернистого перлита, а также образованием карбидных фаз по границам ферритных областей – цилиндрической и сферической формы. При этом происходит увеличение размеров зернистого перлита на 15...20 %. При степени предварительной деформации 40 % происходит полный распад мартенсита, образуется зернистый перлит преимущественно по границам зерен и карбидные частицы в нем имеют цилиндрическую форму.

Таким образом, в углеродистом сплаве наличие предварительной холодной деформации увеличивает скорость распада мартенсита.

В результате распада мартенсита борсодержащего сплава микроструктурно наблюдали образование частиц, которые на основании результатов данных рентгеноструктурного анализа идентифицировали как борцементит. Микролегирование сплава бором, при тех же условиях предварительной обработки, что и углеродистого сплава приводит к увеличению скорости распада мартенсита. При этом возросла объемная доля частиц борцементита, но размер частиц уменьшается по сравнению с карбидами, которые образуются в результате распада мартенсита углеродистого сплава при тех же условиях предварительной деформации. В борсодержащем сплаве микроструктурно наблюдали наличие субзерен. Свободные частицы борцементита находились по границам субзерен. Вероятно, это связано с большей термодинамической устойчивостью частиц, расположенных в дефектных областях твердого раствора.

В борсодержащем сплаве, не прошедшем предварительную деформацию, в результате отпуска мартенсита образуются борокарбидные мелкодисперсные фазы в сорбите.

В сплаве, содержащем бор и прошедшем предварительную деформацию со степенью 7 %, происходит образование сорбитообразного перлита. Борокарбидная фаза –  $Fe_3(CB)$  имеет сферическую форму и выделялась в виде скоплений. Увеличение степени предварительной деформации до 20 % позволяет получить, помимо областей с зернистым перлитом, образование борокарбидных фаз как по границам зерен, так и в объеме ферритных областей. При этом наряду с крупными борокарбидами образуются более мелкодисперсные. Дальнейшее увеличение степени предварительной деформации

приводит к уменьшению размеров борокарбидов.

Увеличение степени предварительной деформации в борсодержащем сплаве способствует более равномерному распределению бороцементитных частиц, образовавшихся в результате распада мартенсита.

### Выводы

1. Микролегирование бором приводит к повышению твердости мартенсита как после предварительной холодной деформации, так и без нее.

2. Показано, что при малой степени деформации 7 % как в низкоуглеродистом, так и борсодержащем сплаве процесс распада мартенсита происходит менее интенсивно.

3. Продуктами распада мартенсита в борсодержащем сплаве является бороцементит и феррит.

4. Увеличение степени предварительной деформации в борсодержащем сплаве способствует более равномерному распределению бороцементитных частиц, образовавшихся в результате распада мартенсита.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курдюмов, Г. В. Превращения в железе и стали [Текст] / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 237 с.
2. Грузин, П. И. Проблемы металловедения и физики металлов [Текст] / П. И. Грузин, Н. В. Корев, Г. В. Курдюмов. – Сборник 111. – Металлургиздат, 1952. – 225 с.
3. Гольдштейн, Я. Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали [Текст] / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М: Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Suzuki, S. Phosphorus and Boron Segregation at Prior Austenite Grain Boundaries in Low-alloyed Steel [Text] / S. Suzuki, M. Tanino, Y. Waseda // ISIJ International. – 2002. – Vol. 42, No. 6. – P. 676-678.
5. Wu, P. Non-equilibrium solute segregation to austenitic grain boundary in ferrum-nickel alloy [Text] / P. Wu, D. Y. Yu, X. L. He // Acta Metallurgica Sinica. – 2001/ – Vol. 14, № 6. – P. 525-531.
6. Берштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Текст] / М. Л. Берштейн. – т. 1. – М.: Металлургия, 1968. – 596 с.

Поступила в редколлегию 13.10.2009.

Принята к печати 07.12.2009.