

УДК 669.15

*А.В. Поздняков, А.Ю. Чурюмов, А.А. Царьков,
А.И. Базлов, А.Н. Солонин*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТИ/В НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ БОРА*

Аннотация. Стали с высоким содержанием бора являются практически единственным конструкционным материалом для изготовления стеллажей уплотненного хранения отработавшего ядерного топлива. Исследовано влияние соотношения концентраций Тi/В и скорости охлаждения на микроструктуру, фазовый состав и твердость стали с повышенным содержанием бора (более 2 %). Показано, что микроструктура стали состоит из частиц боридов $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$ и TiB_2 , равномерно распределенных в ферритной основе. Увеличение скорости охлаждения приводит к уменьшению размеров TiB_2 с 20 до 2 мкм, образованию более дисперсной эвтектики феррит + $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$ и, как следствие, повышению твердости.

Ключевые слова: сталь, бориды, микроструктура, твердость.

*Pozdniakov A.V., Churyumov A.Yu., Tsarkov A.A.,
Bazlov A.I., Solonin A.N.*

National University of Science and Technology "MISIS"

INFLUENCE OF THE RATIO TI/B ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF STEEL WITH HIGH BORON CONTENT

Abstract. Steels with high boron content are the most used material for the compact storage racks for used nuclear fuel. The influence of the concentration ratio of Ti/B and the cooling rate on the microstructure and hardness of the steel with a high content of boron was investigated. It is shown that the microstructure of steel is composed of particles of $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$ and TiB_2 , uniformly distributed in the ferrite matrix. Increasing the cooling rate leads to a decrease TiB_2 sizes from 20 to 2 micrometers and to disperse of the eutectic ferrite + $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$ and, consequently, increased the hardness.

Keywords: steel, borides, microstructure, hardness.

E-MAIL: pozdniakov@misis.ru

Коррозионностойкие стали с высоким содержанием бора являются практически единственным конструкционным материалом для изготовления стеллажей уплотненного хранения отработавшего ядерного топлива благодаря высокой способности бора поглощать нейтронное излучение. Помимо способности поглощать нейтроны, сталь должна обладать также хорошим комплексом антикоррозионных, механических свойств и технологичностью при обработке давлением. Последнее свойство определяется микроструктурой и фазовым составом литых полуфабрикатов. В работах [1, 2] показано, что добавление титана в количестве одного атома на каждый атом бора (массовое соотношение $\text{Ti/B} = 2,7$) положительно сказывается на пластичности стали при комнатной температуре как в литом, так и в горячекатаном состоянии. Это в основном связано с из-

мельчением зерна и уменьшением размера боридов [3], а также с образованием диборидов титана (TiB_2) вместо боридов железа и хрома $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$ [4, 5] благодаря большей термодинамической стабильности первых [6, 7]. Однако, из-за большого количества в структуре хрупких боридов, сталь обладает низким уровнем пластичности как при комнатной, так и при повышенных температурах. В связи с этим содержание бора в применяемых в настоящее время сталях ограничено 1,8 % (по массе) (сталь ЧС-82). Для уменьшения отрицательного влияния боридов применяли разные способы, такие как, например, ультразвуковая обработка расплава [8]. В настоящей работе исследовано влияние соотношения концентраций Тi/В и скорости охлаждения на микроструктуру, фазовый состав и твердость стали с повышенным содержанием бора (более 2 %). Исследование таких сталей является актуальным в связи с переходом атомных станций на более обогащенное топливо и ужесточением требований к конструкционным материалам, в частности по поглощающей способности.

В качестве объекта исследования были выбраны образцы стали, содержащей, % (по массе) 13,0 – 14,7 Cr,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Создание современного производства стеллажей хранения тепловыделяющих сборок с использованием стали с повышенным содержанием бора».

10,0 – 12,0 Ti, 2,2 – 3,8 В с небольшим количеством технологических примесей. В таблице представлены составы трех исследуемых сталей. В малых количествах во всех сталях присутствуют примеси S, P, Ni, W, V, N, Al, Nb и Ce с суммарной концентрацией не более 0,5 % (по массе).

Для выплавки стали использовали следующие материалы: Fe (99,9 %), Cr (99,9 %), Ti (99,9 %), ферробор (ФБ20). Плавку проводили в индукционной вакуумной печи Indutherm MC 20V. Массу одной плавки составляла 40 – 55 г. Разливку проводили с температур 1450 – 1550 °С в графитовую изложницу, а также охлаждали расплав в тигле.

Образцы для микроструктурных исследований подготавливали на шлифовально-полировальной установке Struers Laborol-5. Микрорентгеноспектральный анализ состава фаз проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3 LMN с энергодисперсионным детектором X-Max 80.

Количественные измерения параметров микроструктуры образцов выполняли с использованием сис-

темы анализа изображения Axiovert 200MMAT с программным обеспечением Axiovision 4.5.

Твердость стали определяли методом Виккерса на твердомере ИТ 5010. На индентор подавалась нагрузка 5 кг, на каждом образце проводили по пять измерений.

Микроструктура стали № 1 после заливки в графитовую изложницу состоит из дисперсных темных частиц боридов титана TiB_2 , равномерно распределенных в плоскости шлифа, серых дендритов феррита и темно-серой феррито-боридной эвтектики (феррит + $(Fe, Cr)_2B$) (рис. 1, а). При охлаждении с тиглем происходит образование более крупных темных перистых частиц боридов титана TiB_2 и формируется более грубая микроструктура.

Снижение концентрации бора и одновременное повышение соотношения Ti/B в стали, охлажденной в изложнице, приводит к образованию более дисперсной эвтектики (феррит + $(Fe, Cr)_2B$) и снижению объемной доли частиц TiB_2 средним размером 2 мкм с 13 до 10 % (рис. 1, а, в, д и 2, а). При охлаждении с тиглем размер частиц TiB_2 в продольном направлении дохо-

Химический состав исследуемых сталей, % (по массе)

| Номер стали | Cr | Ti | B | Mn | Si | Примеси | Fe | Ti/B |
|-------------|------|------|-----|-----|-----|---------|-----------|------|
| 1 | 13 | 12 | 3,8 | 0,5 | 0,4 | <0,5 | Остальное | 3,2 |
| 2 | 13,5 | 10,5 | 2,7 | 0,6 | 0,4 | <0,5 | Остальное | 4 |
| 3 | 14,7 | 10,0 | 2,2 | 0,6 | 0,6 | <0,5 | Остальное | 4,6 |

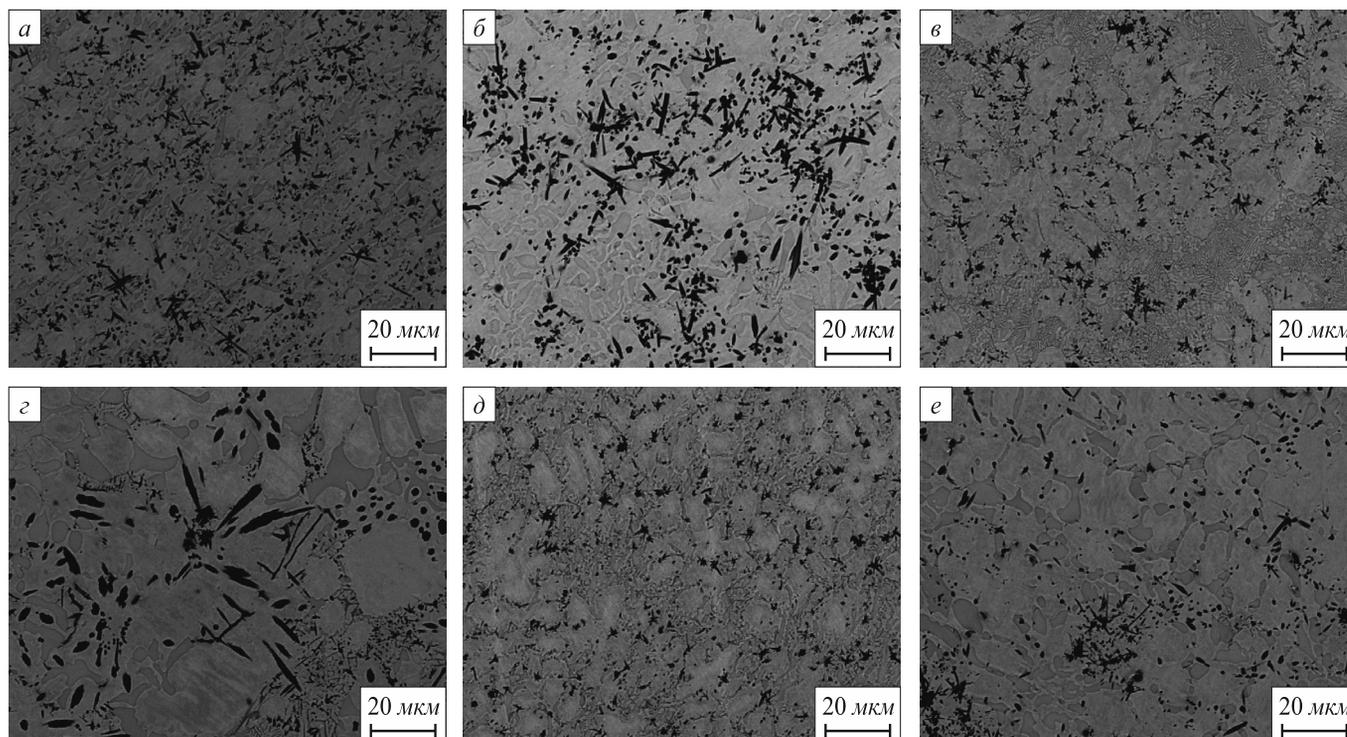


Рис. 1. Микроструктура сталей № 1 (а, б), № 2 (в, г) и № 3 (д, е): а, в, д – литье в кокиль; б, г, е – охлаждение с тиглем

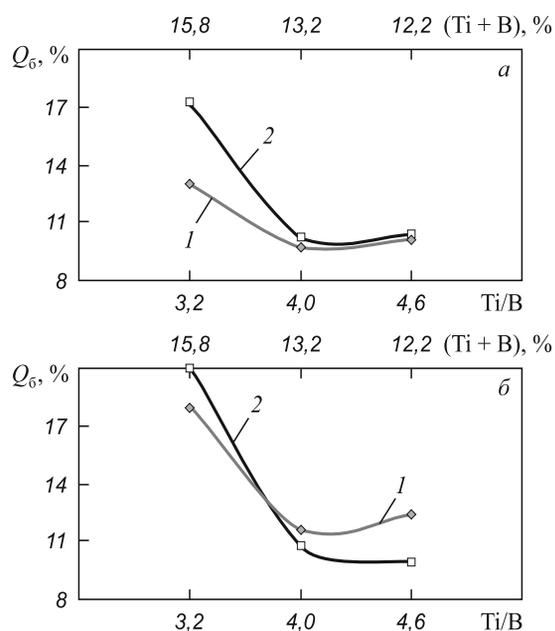


Рис. 2. Изменение объемной доли боридов в зависимости от увеличения соотношения Ti/V и снижения концентрации (Ti + V), % (по массе): а – литье в кокиль; б – охлаждение с тиглем; 1 – TiB₂; 2 – (Fe, Cr)₂B

дит до 20 мкм, а в поперечном не превышает 3 мкм (рис. 1, б, з, е). Снижение концентрации бора с одновременным повышением соотношения Ti/V приводит к уменьшению объемной доли (Fe, Cr)₂B примерно с 20 до 10 % (рис. 2, б). Вероятнее всего, большего снижения количества нежелательного борида (Fe, Cr)₂B можно добиться, уменьшив концентрацию Cr в стали, однако это приведет к потере антикоррозионных свойств. В результате наиболее благоприятной для обработки давлением микроструктуры можно достичь при соотношении концентраций Ti/V = 4,6 и концентрации бора примерно 2,2 %.

Из рис. 3 видно, что с увеличением соотношения Ti/V и снижением концентрации (Ti + V) в литой стали происходит падение твердости на 80 – 100 HV. Кроме того, более дисперсная микроструктура стали, охлажденной в графитовой изложнице, обеспечивает уровень твердости примерно на 50 HV выше, чем при охлаждении с тиглем.

Выводы. Проведен анализ влияния соотношения Ti/V, концентрации Ti и V и скорости охлаждения при кристаллизации на микроструктуру и фазовый состав

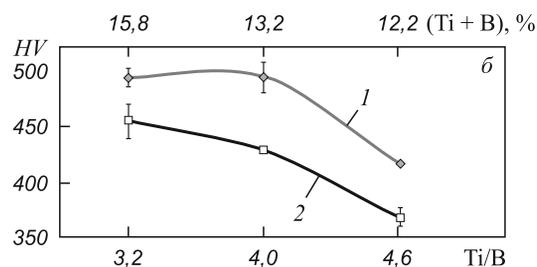


Рис. 3. Изменение твердости стали в зависимости от увеличения соотношения Ti/V и снижения концентрации (Ti + V), % (по массе): 1 – охлаждение в изложнице; 2 – охлаждение в тигле

стали с высоким содержанием бора. Показано, что микроструктура стали состоит из частиц боридов (Fe, Cr)₂B и TiB₂, равномерно распределенных в ферритной основе. Увеличение скорости охлаждения приводит к уменьшению размеров TiB₂ с 20 до 2 мкм, образованию более дисперсной эвтектики (феррит + (Fe, Cr)₂B) и, как следствие, повышению твердости. Снижение концентрации бора и одновременное повышение соотношения Ti/V приводит к уменьшению объемной доли боридов, практически не меняя их относительного содержания. В результате наиболее благоприятной для обработки давлением микроструктуры можно достичь при соотношении концентраций Ti/V = 4,6 и концентрации бора примерно 2,2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. He L., Liu Y., Li J., Li B. // Materials and Design. 2012. Vol. 36. P. 88 – 93.
2. Liu Y., Li B., Li J. et al // Materials Letters. 2010. Vol. 64. P. 1299 – 1301.
3. Zhong L., Xiang C., Yan-xiang L., Kai-hua H. // Journal of iron and steel research, international. 2009. Vol. 16(3). P. 37 – 42.
4. Tanaka K., Saito T. // Journal of Phase Equilibria. 1999. Vol. 20 (3). P. 207 – 214.
5. Raghavan V. // Journal of Phase Equilibria. 2003. Vol. 24 (5). P. 459 – 460.
6. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
7. Бор, его соединения и сплавы. / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач, М.Г. Валяшко. – Киев: АН УССР, 1960. – 590 с.
8. Alshevskii L.E., Kuzmichev Yu.S., Kurochkina L.M., et al. // Atomnaya Energya. 1964. Vol. 20. P. 440 – 442.

© 2014 г. Поздняков А.В., Чурюмов А.Ю., Царьков А.А., Базлов А.И., Солонин А.Н.
Поступила 13 ноября 2013 г.