



УДК 669.781.15

Поступила 20.06.2016

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ НА ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ

INFLUENCE OF MICROALLOYING BY BORON ON HARDENABILITY OF STEEL

*Е. П. БАРАДЫНЦЕВА, Н. А. ГЛАЗУНОВА, О. В. РОГОВЦОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская область, Беларусь, ул. Промышленная, 37.
E-mail: nmv.czl@bmz.gomel.by*

E. P. BARADYNTSEVA, N. A. GLAZUNOVA, O. V. ROGOVTSOVA, JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zlobin city, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: nmv.czl@bmz.gomel.by

В данной статье описано исследование, проведенное в лаборатории металловедения, в результате которого проанализированы факторы, оказывающие влияние на прокаливаемость сталей, микролегированных бором, так как их внедрение в массовое производство сопряжено с определенными трудностями.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что, изменяя содержание химических элементов, таких, как азот, бор, титан и алюминий в сталях с бором производства ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», можно спрогнозировать значения прокаливаемости на стадии разработки технологических карт на выплавку.

The research conducted in laboratory of metallurgical science by which the factors exerting impact on hardenability of steel microalloyed by boron were analysed. The research was made because the implementation of this process in mass production is connected with the certain difficulties.

The conducted researches have allowed to draw a conclusion that changing content of various chemical elements, such as nitrogen, boron, the titan and aluminum in steel containing boron, produced by JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC» at the stage of preparation of chart flowsheet make it possible to predict terms of hardenability of the final product.

Ключевые слова. *Исследование, микролегирование, прокаливаемость, общий бор, «эффективный» бор, нитридообразующие элементы.*

Keywords. *Research, microalloying, hardenability, general boron, «effective» boron, formative nitride elements.*

В настоящее время конъюнктура мировых рынков металлопродукции такова, что требует производства проката с нормируемой прокаливаемостью, предназначенного для изготовления деталей в автомобилестроении.

Прокаливаемость – это способность стали приобретать высокую твердость на различную глубину. Глубина полученного при этом закаленного слоя с мартенситной или мартенситно-трооститной структурой зависит от многих факторов, в том числе от состава аустенита. Многие химические элементы в той или иной степени, растворяющиеся в аустените, увеличивают прокаливаемость. Однако ни один из элементов при содержании порядка 0,0005% не может сравниться с бором по эффективности. При таком малом содержании бор оказывает существенное влияние на свойства стали.

Небольшие добавки бора вызывают значительное измельчение зерен, повышение жаропрочности в результате упрочнения границ зерен боридами, возрастают твердость и износостойкость, горячая пластичность слитков, улучшается свариваемость жаростойких аустенитных сталей. Однако одним из основных качеств бора является его способность резко повышать прокаливаемость стали по сравнению с аналогичной сталью без бора. Такое влияние бора на прокаливаемость стали основано на его способности эффективно тормозить превращение аустенита в феррит, способствуя образованию более твердых фаз – бейнита и мартенсита. Растворенный в металлической матрице бор концентрируется в тонких приграничных слоях зерен аустенита, делая структуру границ зерен более совершенной. Как известно, центры рекристаллизации в первую очередь образуются по границам зерен. Таким образом, растворенный

в матрице бор увеличивает инкубационный период зарождения новой фазы, снижает температуру начала образования феррита, в результате, подавляя распад аустенита по диффузионному принципу [1].

Микродобавки бора, обычно не более 0,001–0,003%, позволяют экономить такие остродефицитные легирующие элементы, как никель, хром, молибден и марганец, сохраняя при этом необходимый уровень прокаливаемости и других механических свойств. Увеличение содержания бора свыше 0,004% уже не сказывается на прокаливаемости и может даже несколько уменьшать ее.

В некоторых литературных источниках сообщается, что действие бора в пределах 0,001–0,0025% эквивалентно действию присадки 1,33% Ni + 0,31% Cr + 0,4% Mo. Так, действие 0,002% бора на прокаливаемость равнозначно влиянию 1,5% Ni. Эквивалентное содержание бора для получения равной прокаливаемости различно для разных сталей и зависит от состава и соотношения элементов [2] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Количество химических элементов, эквивалентное 0,001% бора, введенного в сталь

Основной состав стали, %		Эквивалентное количество легирующих элементов, %			
C	Mn	Mn	Ni	Cr	Mo
0,2	0,75	0,85	2,4	0,42	0,35
0,4	0,75	0,85	1,9	0,35	0,25
0,6	0,75	0,45	1,2	0,20	0,15
0,8	0,75	0,15	0,4	0,07	0,05
0,001% B					

Все перечисленное выше делает бор обязательным компонентом многих высокопрочных низколегированных сталей, разработка которых является одним из важнейших направлений в металлургии. Другими словами, разработка и внедрение в производство борсодержащих марок стали имеют важное промышленное значение.

За период август – сентябрь 2015 г. на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» произведен сортовой прокат для автопрома в объеме четырех плавков из борсодержащих марок сталей с нормируемой прокаливаемостью.

Необходимо отметить, что, несмотря на технологические преимущества борсодержащих сталей, их внедрение в массовое производство сопряжено с определенными трудностями. Так, при проведении механических испытаний на определение полосы прокаливаемости на двух плавках стали марки 30MnB4 были получены удовлетворительные результаты испытаний, а на двух последующих плавках стали марки 35MB5 – неудовлетворительные результаты испытаний. Для выяснения причины получения неудовлетворительных испытаний в лаборатории металловедения ЦЗЛ были проанализированы все факторы, оказывающие влияние на прокаливаемость сталей [3].

1. В первую очередь проверили возможное влияние способа подготовки образцов для испытаний (кованый или точеный образец). Значения прокаливаемости на точеном и кованом образцах практически одинаковые и на расстоянии 20 мм от поверхности торца обоих образцов получен неудовлетворительный результат.

2. Важными факторами, определяющими прокаливаемость, являются также **исходная структура стали перед закалкой и величина аустенитного зерна**. В исследуемых плавках структура горячекатаного металла перлитная с ферритной оторочкой, у поверхности наблюдается частичное обезуглероживание. Величина аустенитного зерна в исследуемых плавках составила 7,5–8,0 для стали марки 30MnB4 и 7,0–7,5 для стали марки 35MB5 в соответствии со шкалой ASTM E112. В требованиях контрактов нормируется величина зерна в пределах 6–8 номеров. По исследованиям некоторых специалистов, наиболее благоприятна величина зерна 7-го номера в соответствии со шкалой ASTM E112.

3. Известно, что с повышением температуры нагрева под закалку и увеличением продолжительности выдержки прокаливаемость стали, как правило, увеличивается (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Параметры термической обработки исследуемых плавков

Номер плавки	Марка стали	Параметры закалки, °С – мин/ охлаждающая среда
1	30MnB4	880–30 / вода
2		880–30 / вода
3	35MB5	870–30 / вода
4		870–50 / вода

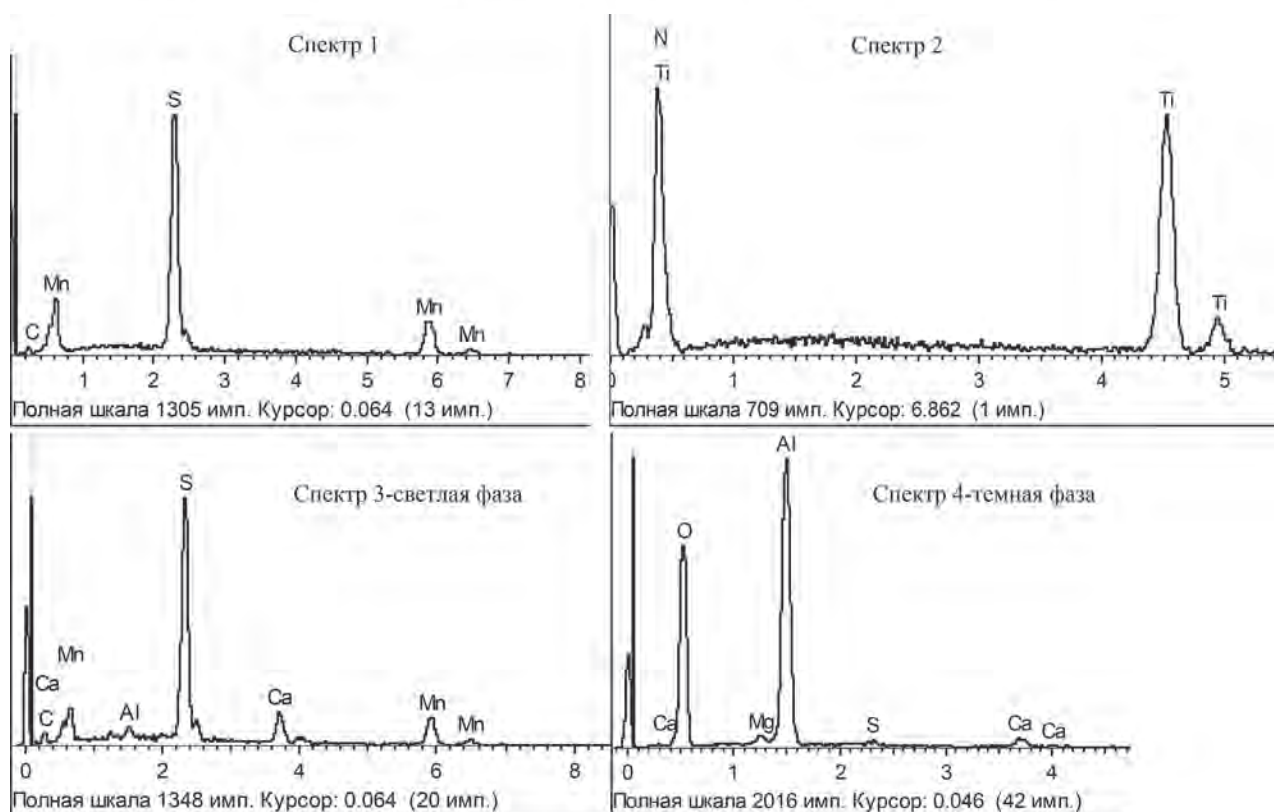
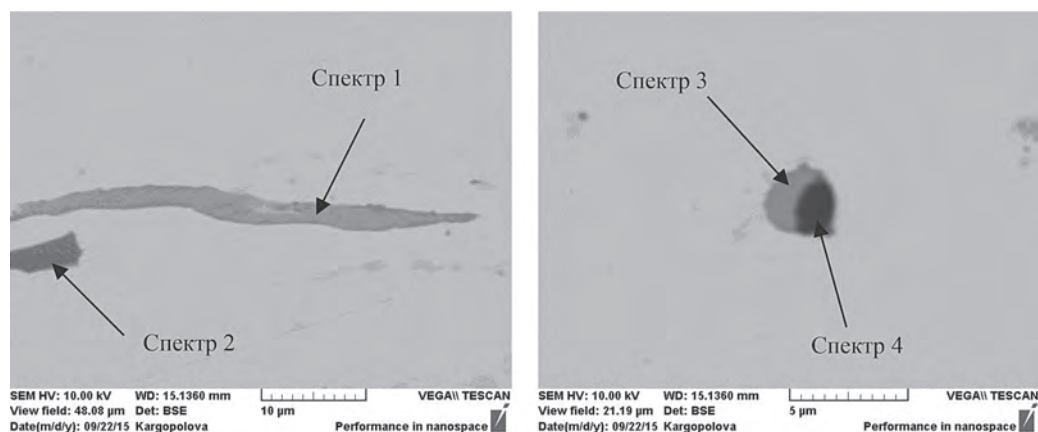


Рис. 1. Состав типичных неметаллических включений в исследуемых плавках с удовлетворительной полосой прокаливаемости

На исследуемых плавках условия термической обработки практически одинаковы. Поэтому данным фактором можно пренебречь.

4. **Скорость кристаллизации.** Это влияние проявляется через микронеоднородность химического происхождения. Чем выше скорость охлаждения, тем грубее дендритная структура, и, следовательно, химическая неоднородность больше.

5. Влияние химического состава и неметаллических включений рассмотрим более подробно.

Особенностью производства борсодержащих сталей является то, что на прокаливаемость оказывает влияние не весь бор, а только та его часть, которая не связана в оксиды, нитриды или в другие соединения и находится в твердом растворе в аустените (так называемый «свободный» или «эффективный» бор). Бор – исключительно активный и реакционноспособный элемент, легко окисляется и связывается в нитриды и, будучи введенный в расплав, он активно взаимодействует даже с очень малыми, остаточными концентрациями растворенных в металле кислородом и азотом [4]. Поэтому основная задача при борном микролегировании – предотвратить окисление и азотирование бора и получить в металле требуемое количество растворенного бора, что требует соблюдения особых мер при выплавке борсодержащей стали.

Соединения бора образуются преимущественно в процессе кристаллизации стали, поэтому необходимы определенные воздействия на расплав, чтобы обеспечить его состав по кислороду, сере и азоту за

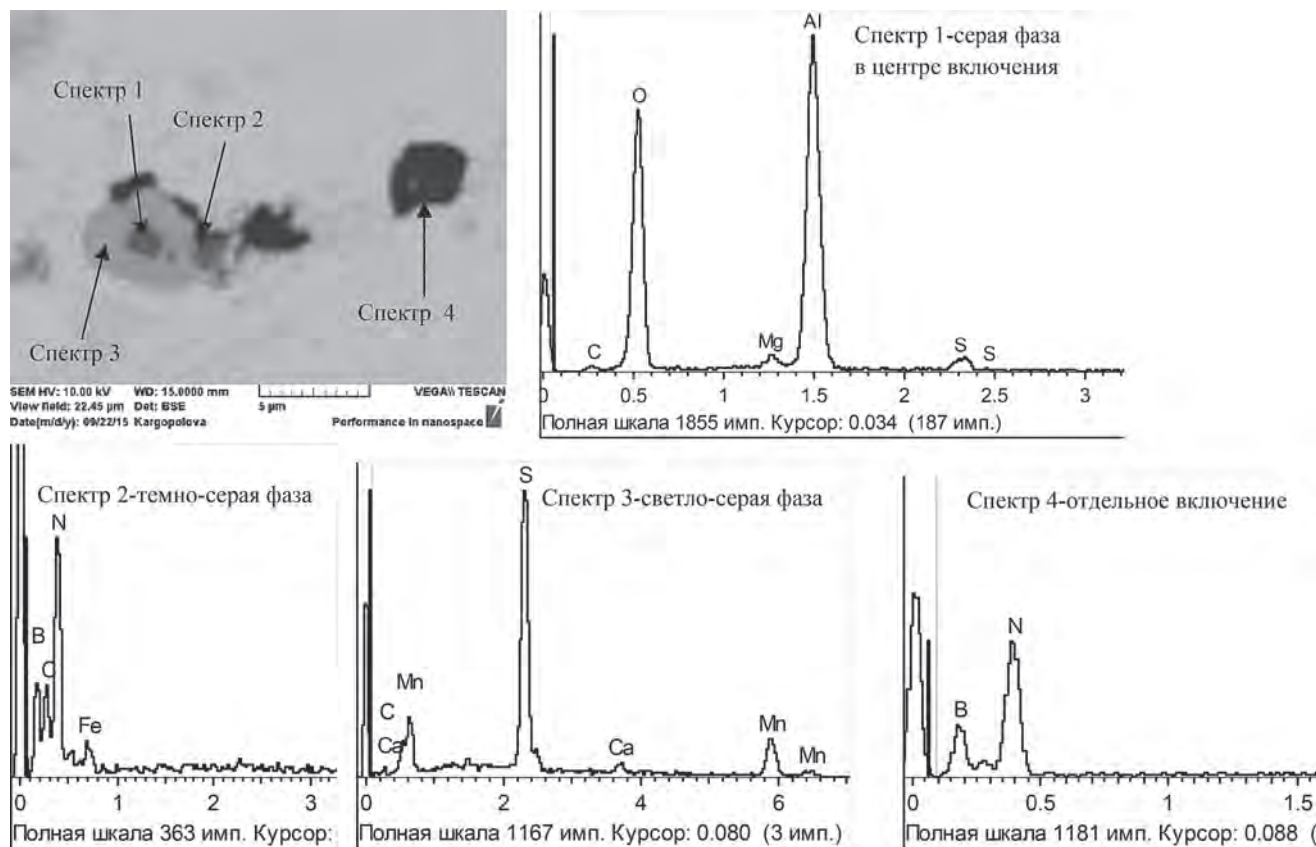


Рис. 2. Состав типичных неметаллических включений в исследуемых плавках с неудовлетворительной полосой прокаливаемости

счет рафинирования либо микролегирования, позволяющие достичь определенного уровня (конкретную долю) «эффективного» бора в металле после кристаллизации.

В случае, когда окончательное раскисление осуществляется алюминием, достигаемые значения по остаточному кислороду и сере весьма низкие, и эти элементы не оказывают определяющего влияния на долю «эффективного» бора. Поэтому считается, что основным элементом, оказывающим ключевое влияние на величину «эффективного» бора, является азот [5]. Образования нитридов бора в этом случае следует избегать, для чего в металл вводится титан, который обладает большим сродством к азоту, чем бор, и также образует нитриды в жидкой фазе. Обычно при выплавке стали с микродобавкой бора вводят титана в 4–5 раз больше (в виде ферротитана), чем содержание азота в стали, учитывая отношение атомных весов титана и азота, а также степень усвоения титана.

Анализ химического состава исследуемых плавок показал, что основным отличием плавок с удовлетворительным результатом механических испытаний от плавок с неудовлетворительным результатом является содержание бора и титана при одинаковом содержании азота. При металлографическом исследовании неметаллических включений на образцах плавок с удовлетворительными результатами механических испытаний по прокаливаемости были выявлены включения нитридов титана, а на плавках с низкими значениями прокаливаемости нитридов титана не наблюдалось. Дополнительно образцы исследовались на РЭМ с РМА. Были получены следующие результаты: на образцах с низкой прокаливаемостью обнаружены нитриды и карбонитриды бора, а на образцах с высокой прокаливаемостью – в составе включений бора не было (рис. 1, 2).

Таким образом, мы убедились, что в случае борсодержащих марок стали общее содержание легирующих элементов не является главным, здесь более важна форма присутствия элементов в стали. Данный факт полностью объясняет возникновение нестабильности получаемых свойств.

На Нижнеднепровском трубопрокатном заводе данная проблема решается с помощью электрохимического метода фазового анализа, при котором отделяется эффективный бор, находящийся в твердом растворе стали, от бора, связанного в оксиды, нитриды и другие соединения. Содержание эффективного бора определяется по ГОСТ в условиях, когда после электролиза в анализ попадает только эффективная часть бора, не связанная в различные соединения [6].

Еще существует метод определения доли «эффективного» бора по разности между данными анализов общего бора (методом разложения концентрированной фосфорной кислотой) и нерастворимого бора (методом растворения в йод-метаноле).

Также на базе ОАО «ОЭМК» разработана и опробована математическая модель, которая позволяет спрогнозировать долю «эффективного» бора, исходя из содержания азота и нитридообразующих элементов в стали (титана и алюминия), определив, тем самым, количество бора, связанного в соединения, т. е. «эффективный» бор можно спрогнозировать на основе анализа термодинамического равновесия системы Fe–Al–Ti–B–N. По результатам расчета в программе производится построение графиков зависимости содержания «эффективного» бора от содержания титана при трех различных содержаниях алюминия [7].

В настоящее время на ОАО «БМЗ» определяется общее содержание бора в стали, а методика определения содержания «эффективного» бора отсутствует. В связи с этим необходимо скорректировать химический состав борсодержащих марок сталей с учетом соблюдения соотношения азота и титана 1:4. Изменяя содержание химических элементов, таких, как азот, бор, титан и алюминий в сталях с бором производства ОАО «БМЗ», можно спрогнозировать значения прокаливаемости на стадии разработки техкарт на выплавку.

Литература

1. Архаров В. И. Теория микролегирования сплавов. М.: Машиностроение, 1975, 61 с.
2. <http://metal-archive.ru/boridnye-pokrytiya/107-bor-v-stali.html>
3. Качанов Н. Н. Прокаливаемость стали. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1978, 192 с.
4. Лякишев Н. П., Плинер Ю. Л., Лаппо С. И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Metallurgia, 1986, С. 72–73.
5. Потапов А. И., Семин А. Е. Технологические особенности легирования стали бором // Изв. вузов. Черная металлургия 2012. № 9. С. 68–69.
6. Исаева Л. Е., Лев И. Е., Великонская Н. М., Безшкуненко А. Г. Перспективы выплавки сталей с повышенной прокаливаемостью за счет бора // Сб. тез. IX Междунар. науч.-практ. конф. «Литье 2013», Украина, Запорожье, 2013. С. 261–262.
7. Потапов А. И. Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства борсодержащей стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 116 с.

References

1. Arharov V. I. *Teorija mikrolegirovanija splavov* [The theory of micro alloying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 61 p.
2. <http://metal-archive.ru/boridnye-pokrytiya/107-bor-v-stali.html>
3. Kachanov N. N. *Prokalivaemost' stali* [Steel hardenability]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 192 p.
4. Ljakishev N. P., Pliner Ju. L., Lappo S. I. *Borsoderzhaschie stali i splavy* [Boron steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, pp. 72–73.
5. Potapov A. I., Semin A. E. *Tehnologicheskie osobennosti legirovanija stali borom* [Technological features of doping with boron steel]. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija = Ferrous metallurgy*, 2012, no. 9, pp. 68–69.
6. Isaeva L. E., Lev I. E., Velikonskaja N. M., Bezshkurenko A. G. *Perspektivy vyplavki stalej s povyshennoj prokalivaemost'ju za schet bora* [Prospects for smelting steel with high hardenability due to boron]. Zaporozh'e, 2013, pp. 261–262.
7. Potapov A. I. *Issledovanie processov mikrolegirovanija stali borom s cel'ju sovershenstvovanija tehnologii proizvodstva borsoderzhashhej stali*. Avtoref. diss. cand. techn. nauk [Investigation processes microalloying steel with boron to improve boron steel production technology. Avtoreferat cand. Diss.]. Moscow, 2013, 116 p.