



УДК 669.18:661.65

Производство

Л. В. Камкина /д. т. н./  
Национальная металлургическая академия  
Украины  
В. С. Манидин  
ПАО «Запорожсталь»

С. В. Пройдак /к. т. н./  
Днепропетровский национальный университет  
железнодорожного транспорта

## Физико-химические и технологические особенности производства экономнолегированных борсодержащих сталей

Рассмотрены особенности взаимодействия раскислителей с растворенным кислородом в металле. Представлена информация о влиянии концентрации бора на механические свойства стали. Изложены результаты промышленных исследований микролегирования низкоуглеродистой стали бором в условиях ПАО «Запорожсталь». (Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.).

**Ключевые слова:** бор, низколегированная сталь, механическая прочность, структура

Considered peculiarities of the interaction deoxidants with dissolved oxygen in the metal. Represented the information about the influence of boron concentration on the mechanical properties of the steel. Represented the results of industrial research microalloying low carbon steel with boron at PSC «Zaporozhstal».

**Key words:** Borium, low-alloy steel, mechanical stress, structure



## Введение

В современной металлургии наметилась тенденция расширения сортамента и увеличения объемов производства экономно легированных борсодержащих сталей. Этот рост происходит как в традиционных областях использования легирования бором при выплавке высокопрочных и износостойких сталей, так и при производстве сравнительно новых – трубных, для автомобилестроения и др. [1].

Изменение механических и технологических свойств борсодержащих сталей связывают с изменением их микросубструктуры и микроструктуры [2]. Известна высокая эффективность влияния бора на прокаливаемость конструкционных сталей, измельчение структуры при ускоренном охлаждении. Бор в конструкционные легированные стали вводят не только для повышения закаленности, но и для одновременного снижения дефицитных легирующих элементов (никеля, хрома, молибдена и др.) без ухудшения механических свойств и улучшения обрабатываемости, усталостной прочности, свариваемости. Уменьшение общей степени легирования стали позволяет снизить себестоимость стали, улучшить ее технологичность и уменьшить чувствительность структуры к различным концентраторам напряжения [3].

При микролегировании стали бором наблюдается нестабильность усвоения бора в металле [1]. Как показывают результаты исследований [2], вследствие высокой химической активности бора (сильный раскислитель и нитридообразующий элемент) гарантированное получение требуемых свойств стали микролегированием достигается при правильно выбранных технологиях ввода раскислителей в сталь и режимах работы технологического оборудования (стале-плавильного и прокатного).

## Состояние вопроса

Действие бора сказывается только тогда, когда сталь предварительно хорошо раскислена и деазотирована, по-видимому, вследствие того, что бор обладает большим сродством к кислороду и азоту. Поэтому перед введением бора в сталь необходимо ввести алюминий и титан или цирконий. Можно также вводить все добавки из комплексных лигатур [3]. Ввод бора в нераскисленную сталь может привести к образованию неметаллических включений.

Традиционно бор применяли как раскислитель [4]. Сравнительная оценка раскислительной способности бора и других распространенных элементов-раскислителей [5] показала, что раскисляющая способность бора примерно в 3 раза больше, чем кремния [6], но значительно меньше, чем алюминия.

Бор вводится в металл в небольших количествах (0,002...0,005 %) не как раскислитель, а как модификатор (для измельчения зерна и улучшения механических свойств стали). Как азот и углерод, бор образует с железом твердый раствор внедрения, поэтому в спокойных малоуглеродистых сталях он усиливает чувствительность к деформационному старению [7].

## Опробование технологии в условиях комбината «Запорожсталь»

В условиях мартеновского цеха ПАО «Запорожсталь» было проведено промышленное опробование технологии производства низкоуглеродистой стали 08кп, микролегированной бором, в двухванном сталеплавильном агрегате ДСПА-1. Выплавку и разливку стали вели согласно действующим технологическим требованиям. Ферробор вводили в металл при выпуске плавов в ковш по окончании ввода ферромарганца. Все опытные плавки продували в ковше аргоном до появления печного шлака. Для микролегирования применяли ферробор ФБ20 следующего химического состава, мас. %: 18,85 В; 0,47 Si; 0,58 Al; 0,31 С; 0,009 S; 0,023 Р; 0,016 Cu. Химический состав, мас. %, стали 08кп, микролегированной бором (по ковшовым пробам опытных плавов): 0,06–0,08 С; 0,01–0,02 Si; 0,30–0,37 Мп; 0,02 Ni; 0,017–0,024 S; 0,014–0,029 Р; 0,03–0,06 Cr; < 0,02 Cu; 0,008–0,0015 В. Параметры плавов стали 08кп, микролегированной бором, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры плавов стали 08кп, микролегированной бором

Параметр	№ плавки				
	1	2	3	4	6
$C_{\text{вып}} \%$	0,09	0,08	0,08	0,04	0,04
$C_{\text{ковш}} \%$	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
$Mn_{\text{ковш}} \%$	0,32	0,30	0,32	0,37	0,36
Вес плавки (жидк.), т	242,3	243,9	246,2	234,3	240,2
Расход FeB, кг/ковш	75	65	65	75	–
кг/т	0,31	0,27	0,26	0,26	–

Распределение бора по высоте ковша определяли по пробам, отбираемым по окончании наполнения каждого поддона (табл. 2).

Таблица 2

Содержание бора в металлопрокате

Горизонт слитка	Содержание бора, %				
	1	2	3	4	5
Ковш. проба	0,0015	0,0015	0,0009	0,0004	0,0002
I индекс	0,0013	0,0014	0,0010	0,0005	0,0004
II индекс	0,0015	0,0014	0,0010	0,0004	0,0003
III индекс	0,0013	0,0011	0,0009	0,0004	0,0003
IV индекс	0,0013	0,0012	–	–	0,0002
Среднее, %	0,00138	0,00132	0,00095	0,00043	0,00028



При полистной сортировке опытного слитка плавки № 1 (среднее содержание бора по плавке – 0,00138 %) был произведен отбор проб металлопроката на 5 горизонтах по высоте. В каждой пробе химический анализ на содержание бора выполнен в 3 точках, соответствующих краю рулона,  $\frac{1}{4}$  по ширине и оси. Результаты химического анализа приведены в табл. 3. При среднем содержании бора по плавке 0,00138 % содержание бора по высоте и ширине слитка распределилось от 0,0008 % (–0,00058 %) до 0,0024 % (+0,00102 %).

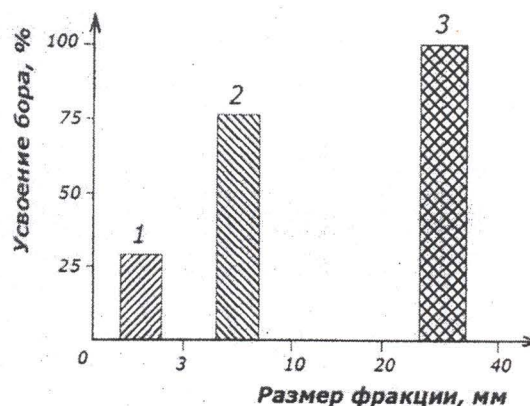
Таблица 3

Содержание бора в металлопрокате по горизонтам

№ пробы	Содержание бора, %			
	Ось	$\frac{1}{4}$	Край	Среднее значение
1 (низ)	0,0009	0,0008	0,0010	0,0009
2	0,0011	0,0011	0,0012	0,0011
3	0,0012	0,0017	0,0015	0,0015
4	0,0015	0,0024	0,0013	0,0017
5 (верх)	0,0014	0,0012	0,0013	0,0013
Среднее	0,0012	0,0014	0,0013	0,0013

В ходе работы отмечено, что усвоение бора из ферробора неодинаково и зависит от способа ввода и крупности ферробора. На рис. 1 представлены результаты анализа усвоения бора в зависимости от фракции ферробора (мм).

При контрольно-сдаточных испытаниях механических свойств в потоке на всех партиях получены результаты по пределу прочности и относительному удлинению (рис. 2 и 3), соответствующие требованиям ГОСТ 16523-97 «Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения». Предел текучести для стали полу-



1 – фракция 0–3 мм; 2 – фракция 5–10 мм;  
3 – фракция 20–40 мм

Рис. 1. Усвоение бора в зависимости от фракционного состава FeB\*, %

\* За 100 % принято усвоение FeB фракцией 20–40 мм.

ченных марок не нормируется. Испытания на холодный изгиб удовлетворительные. Механические свойства всех испытанных образцов соответствуют требованиям ГОСТ 16523-97 для металлопроката стали марки 08кп (группа прочности K260B) толщиной 2,8 мм.

Результаты испытаний механических свойств опытного слитка плавки № 0142740 на соответствие требованиям ГОСТ 16523-97 представлены в табл. 4.

Сравнение механических свойств стали, микролегированной бором, и средних показателей по стали 08кп за прошлый год представлено на рис. 4.

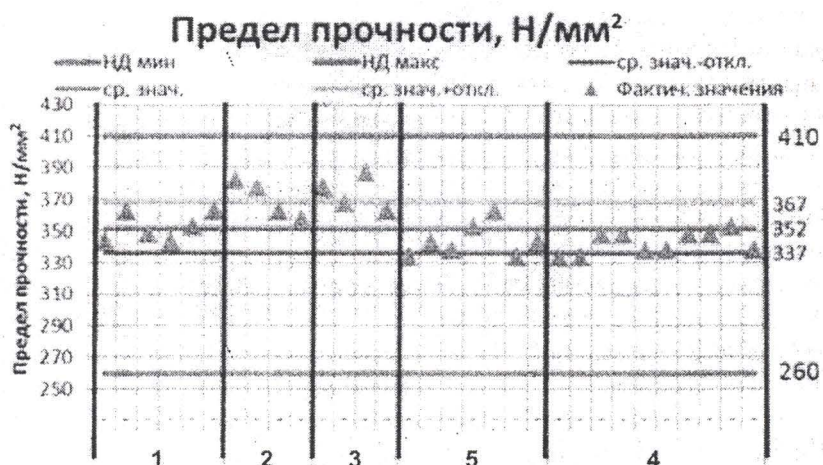
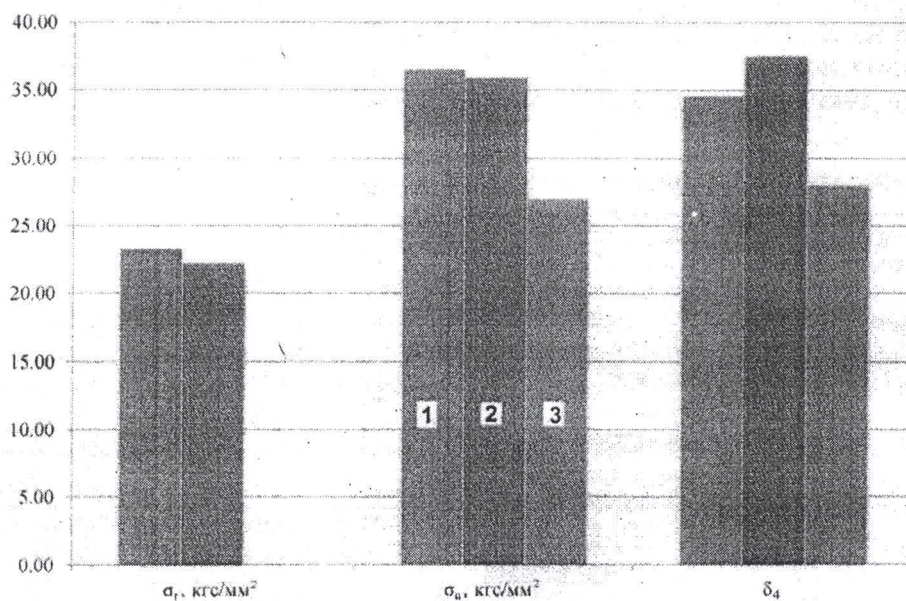
Микролегирование стали 08кп бором увеличивает предел прочности на 4,5 % и предел текучести на 2,6 %, но уменьшает относительное удлинение на 8,8 % по сравнению со средними показателями данной стали без бора. При этом

Таблица 4

Сводные результаты испытаний механических свойств опытного слитка плавки № 0142740

Место отбора пробы по длине рулона / по высоте слитка	Маркировка образцов	Механические свойства		
		$\sigma_r$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
Начало рулона/ Головная часть	11	23,0	37,5	34,0
	12	24,5	37,0	34,0
2/5	21	21,5	35,5	33,0
	22	22,5	35,5	32,0
Середина	31	23,5	37,0	33,0
	32	24,0	36,5	33,0
4/5	41	24,0	36,5	36,0
	42	24,0	36,5	40,0
Конец полосы/ донная часть	51	22,5	36,5	34,0
	52	23,5	36,5	37,0
Требования ГОСТ 16523-97 для г/к металлопроката толщиной 2,8мм		Не нормируется	27–42	до 28



Рис. 2. Предел прочности  $\sigma_t$  металлопроката опытных плавок, Н/мм<sup>2</sup>Рис. 3. Относительное удлинение  $\delta_4$  металлопроката опытных плавок, %

1 – сталь с бором; 2 – сталь без бора; 3 – минимальное требование по НД

Рис. 4. Сравнение механических свойств стали 08кп



все регламентированные показатели стали с бором соответствуют требованиям нормативной документации.

В опытных образцах ковшевых проб контролировали химический (элементный) состав методом фотоэлектрического спектрального анализа на оптико-эмиссионном спектрометре Spectrolab M («SPECTRO», Германия). Анализ микроструктуры выполняли на оптическом металлографическом микроскопе GX-51 («OLIMPUS», Япония) с анализатором изображения IA-32 («LECO», США). Измерение микротвердости выполняли с помощью микротвердомера LM 700AT («LECO», США). Фазовый (качественный) состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре D/MAX2200HL/PC («RIGAKU», Япония).

Для проведения металлографических исследований загрязнённости стали неметаллическими включениями и микроструктуры были отобраны и исследованы образцы от одного рулона сечением 2,8×1220 мм опытной плавки № 0142740 марки 08кп. Микроструктура образцов листового проката из стали 08кп с бором представлена на рис. 5.

Общая загрязнённость металла неметаллическими включениями (типа оксидов точечных, силикатов хрупких, сульфидов) оказалась ниже показателей рядового сортамента. Микроструктура образцов плавки № 142740 (сечением 2,8×1220 мм) представляет собой равноосное зерно феррита № 8, № 8–9 шкалы ГОСТ 5639 и цементита – 2–3 баллов шкалы Л ГОСТ 5640.

Результаты исследования горячекатаного металлопроката стали марки 08кп с микролегированием бором показывают, что загрязнённость металла представленных образцов неметаллическими включениями и микроструктура металла соответствуют уровню этих показателей на металлопрокате стали марки 08кп производства ПАО «Запорожсталь» и соответствуют требованиям нормативной документации.

#### Выводы

1. В условиях мартеновского производства ПАО «Запорожсталь» освоена технология микролегирования низкоуглеродистой стали бором с получением гарантированного содержания на уровне не менее 0,0008 %. Ввод ферробора в ковш с расходом 0,26–0,31 кг/т (65–75 кг/ковш) с последующей продувкой металла в ковше чистым аргонном обеспечивает содержание бора в стали 0,0009–0,0015 %.

2. Усвоение бора при микролегировании зависит от фракционного состава боросодержащего материала. Усвоение ферробора фракцией менее 3 мм составляет 29 %, а фракцией

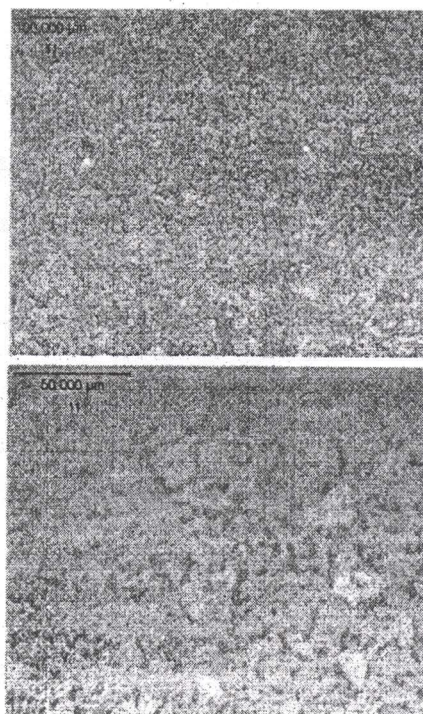


Рис. 5. Микроструктура образцов листового проката с бором

5–10 мм – 76 % от значений, полученных для фракции 20–40 мм. Бор в стали 08кп увеличил предел прочности на 4,5 % и предел текучести на 2,6 % по сравнению со средними показателями данной стали без бора.

#### Библиографический список

1. Манашев И. Р. Особенности микролегирования стали бором и новым материалом – боридом ферротитана / И. Р. Манашев // *Сталь*. – 2009. – № 10. – С. 34–38.
2. Гоман С. В. Микролегирование низкоуглеродистой стали бором ОАО «Запорожсталь» / С. В. Гоман, В. И. Набока, В. С. Манидин [и др.] // *Сталь*. – 2015. – № 6. – С. 15–18.
3. Борсодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, С. И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
4. Меськин В. С. Основы легирования стали / В. С. Меськин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.
5. Куликов И. С. Раскисление металлов / И. С. Куликов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
6. Теоретические основы сталеплавильных процессов: учебн. пособие для вузов / Р. С. Айзатулов, П. С. Харлашин, Е. В. Протопопов, Л. Ю. Назюта. – М.: МИСИС, 2004. – 320 с.
7. Манидин В. С. Производство низкоуглеродистой стали 08Ю, микролегированной бором / В. С. Манидин, Ю. И. Сокур, Л. В. Камкина // *Теория и практика металлургии*. – 2014. – № 1–2. – С. 10–14.

Поступила 1.10.2015