

## ВЛИЯНИЕ АЗОТА И НИТРИДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ БОРСОДЕРЖАЩЕЙ СТАЛИ

А.Н. Мазничевский<sup>1,2</sup>, Ю.Н. Гойхенберг<sup>2</sup>, Р.В. Сприкут<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Ласмет», г. Челябинск,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Изучено влияние концентрации растворенного в стали азота и малых добавок вводимых нитридообразующих элементов на прокаливаемость борсодержащей марганцовисто-ванадиевой стали 40ГФ-ВИ. Показано, что увеличение концентрации азота с 0,004 до 0,015 % увеличивает прокаливаемость стали. Установлено, что при низком содержании в стали азота (0,004 %) уже небольшого количества титана (около 0,02 %) оказывается достаточно для его связывания в нитриды, что позволяет сохранять большую часть бора в активном состоянии (в твердом растворе). При содержании азота в пределах 0,010–0,015 %, что характерно для металла электродуговой плавки, остаточное количество титана и алюминия в пределах 0,015–0,020 % каждого недостаточно для связывания всего азота. В результате часть азота расходуется на образование нитридов бора, что уменьшает эффект влияния последнего на прокаливаемость марганцовисто-ванадиевой стали, микролегированной бором.

*Ключевые слова:* борсодержащая сталь; бор; азот прокаливаемость; улучшение свойств стали.

### Введение

Особое место среди перспективных ресурсосберегающих металлургических технологий занимает микролегирование конструкционной стали бором. Известно [1–5], что введение в сталь бора в количествах до 30 ppm значительно улучшает (примерно в 2,5 раза) прокаливаемость стали. По грубым оценкам, 30 ppm бора может быть эквивалентно проценту марганца (хрома, никеля) или половине процента молибдена [6, 7].

Основным сдерживающим фактором повсеместного внедрения борсодержащих сталей является сложность их изготовления, требующая специальной технологии выплавки и последующей внепечной обработки для предотвращения связывания бора с растворенными в металле кислородом, азотом, углеродом и образования стойких неметаллических включений. Сохранение такого баланса весьма непростая задача, так как при превышении предела растворимости бора в металле, часто образуются легкоплавкие боридные эвтектики, располагающиеся по границам зерен, тем самым снижая пластичность и вязкость стали [2].

Из вышеизложенного следует, что бор, связанный в окислы и нитриды, бесполезен. Следовательно, стали, содержащие бор, должны быть «успокоены» алюминием, чтобы предотвратить образование окислов и легиро-

ваны титаном, чтобы предотвратить образование нитридов бора и сохранить бор в твердом растворе. Микродобавки титана для связывания азота также используют для упрочнения низкоуглеродистой высокопрочной борсодержащей стали.

Для предотвращения образования нитридов бора на заводах США используют добавки титана, а на заводах Франции и Японии – алюминия. Хотя «защита» алюминием требует повышенных его содержаний при высокой концентрации азота, она в целом предпочтительнее, так как введение титана может оказывать отрицательное воздействие на ударную вязкость и усталостную прочность [2]. В последнее время бор вводят с добавками титана, а иногда и циркония. Основным затруднением «защиты» бора алюминием является тот факт, что свободный металлический алюминий может образовывать нитриды только в твердых растворах при температурах ниже 1200–1250 °С, вследствие чего растворенный в жидком металле бор расходуется на связывание азота в нитриды.

Авторами работы [1] предложена эмпирическая формула для расчёта количества «эффективного» (то есть не связанного с азотом и кислородом бора  $B_{эф}$ ), который определяет показатель прокаливаемости:

$$B_{эф}(\%) = [B(\%) - (N(\%) - 0,002) - (Ti(\%)/5) - (Zr(\%)/15)].$$

Несмотря на то, что в технической литературе периодически появляются работы по изучению стали, микролегированной активными элементами [8], в настоящее время очень скудно освещено влияние пониженной концентрации азота на прокаливаемость борсодержащей стали (как правило, в рассматриваемых борсодержащих сталях концентрация азота не определяется). Данное обстоятельство предопределило характер настоящего исследования.

Целью работы была оценка влияния концентрации азота, бора, титана и алюминия на прокаливаемость конструкционной борсодержащей стали типа 40ГФ.

## Материал и методика исследования

Исследовали серию лабораторных плавов, выплавленных в «Лаборатории специальной металлургии» (ООО «Ласмет»).

Плавку осуществляли в лабораторной вакуумно-индукционной печи VSG-30A с тиглем ёмкостью 25 кг с разливкой расплава в конический слиток размером  $\varnothing 113/110 \times 220$  мм и массой 20 кг. Всего было выплавлено и исследовано 6 плавов стали 40ГФс различным микролегированием, химический состав которых приведен в таблице.

Заметим, что плавка 43-1 представляет собой нелегированную титаном и бором сталь 40ГФ-ВИ, плавка 43-2 дополнительно микролегирована бором в количестве 0,0016 %, а 43-3 бором и титаном в пределах марочного состава. Серия плавов 44-1...44-3 имеет состав аналогичный плавкам 43-1...43-3, однако концентрация азота в них выше и доведена до пределов, характерных для стали, полученной в дуговой сталеплавильной печи (0,016 %).

Выплавленные слитки были подвергнуты поверхностной зачистке и затем прокатаны на экспериментальном стане горячей прокатки

250/105  $\times$  350 в прутки квадратного сечения со стороной квадрата 40 мм.

Из полученных прутков были вырезаны стандартные образцы для испытания прокаливаемости методом торцевой закалки по Джомини (ГОСТ 5657–69). Режим термической обработки образцов заключался в их аустенитизации при температуре 860 °С в течение 40 мин с последующей торцевой закалкой водой.

## Результаты исследования и их обсуждение

Данные по прокаливаемости исследуемых стали представлены на рис. 1.

Видно, что сталь со следами титана и невысокой концентрацией азота (0,004 %) имеет меньшую прокаливаемость (рис. 1, а), чем сталь, содержащая больше азота (0,015 %). Отсюда следует, что азот, не связанный в нитриды, хоть и незначительно, но всё же повышает прокаливаемость марганцовисто-ванадиевой стали.

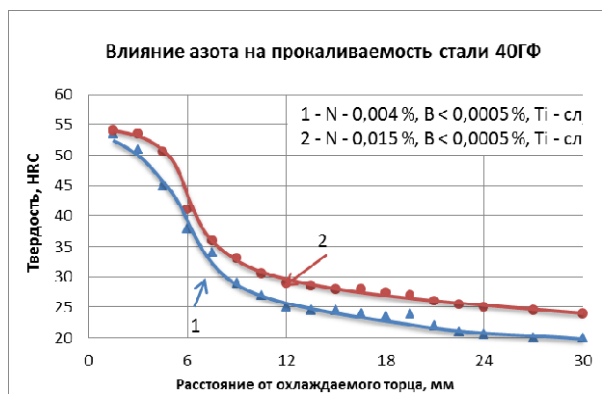
Введение бора в количестве 0,0016 % в азотсодержащую (0,015 %) марганцовисто-ванадиевую сталь оказывает противоположное влияние на прокаливаемость. Она оказывается выше у стали с меньшей концентрацией азота (рис. 1, б). Это свидетельствует о том, что бор в стали, содержащей 0,004 %, находится в активном состоянии, и не связан в труднорастворимые нитриды. Введение бора в сталь с большей концентрацией азота (0,015 %) при отсутствии титана практически не изменяет прокаливаемость (сравни кривые 2 на рис. 1, а и 1, б). Данное обстоятельство, по-видимому, является иллюстрацией того, что на увеличение прокаливаемости оказывает влияние только та часть бора, которая не связана в стойкие соединения.

Комплексное микролегирование марганцовисто-ванадиевых сталей бором и титаном

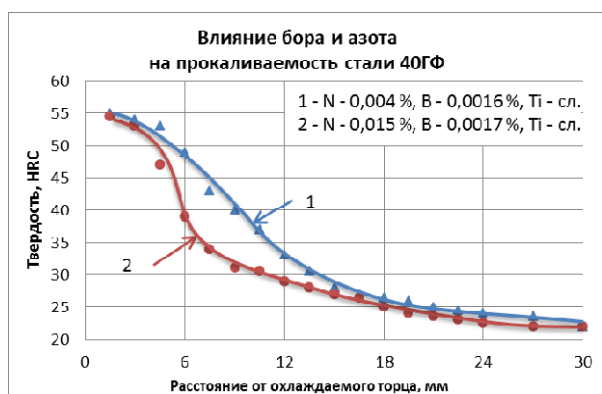
Химический состав стали 40ГФ-ВИ

Плавка	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	V	B	Al <sub>к.р.</sub>	Ti	N
43-1	0,36	0,18	0,96	0,015	0,014	0,28	0,07	< 0,0005	0,018	сл.	0,0036
43-2	0,35	0,18	0,96	0,015	0,014	0,28	0,07	0,0016	0,018	сл.	0,0035
43-3	0,35	0,18	0,96	0,015	0,014	0,28	0,07	0,0013	0,018	0,027	0,0046
44-1	0,35	0,19	0,99	0,015	0,014	0,36	0,07	< 0,0005	0,013	сл.	0,016
44-2	0,36	0,19	0,99	0,015	0,014	0,36	0,07	0,0017	0,013	сл.	0,014
44-3	0,36	0,19	0,99	0,015	0,014	0,36	0,07	0,0021	0,013	0,028	0,016

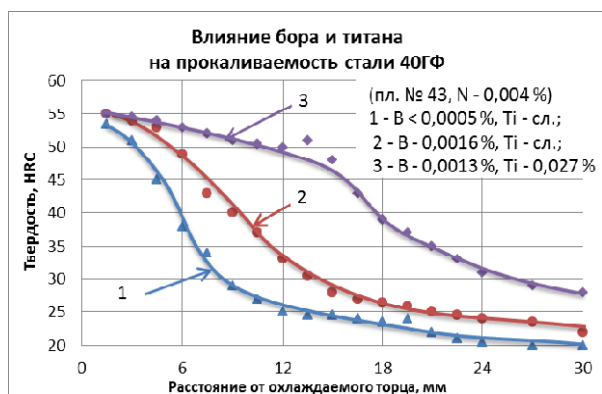
Примечание. Al<sub>к.р.</sub> – кислоторастворимый алюминий.



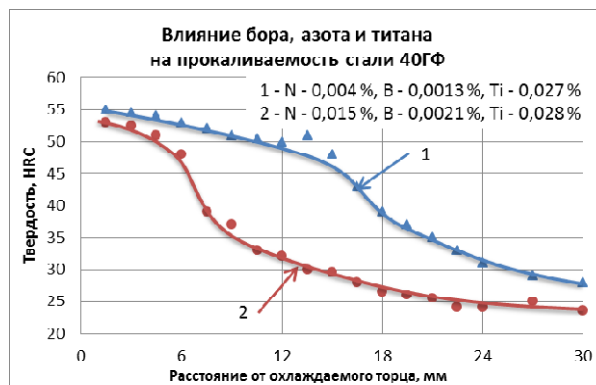
а)



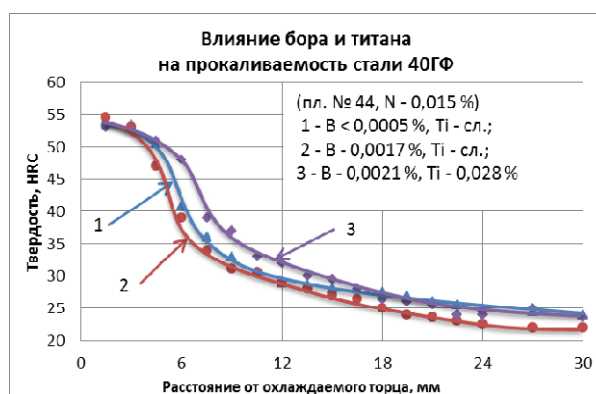
б)



г)



в)



д)

Рис. 1. Прокаливаемость лабораторных плавок стали 40ГФ-ВИ

вызывает резкое увеличение прокаливаемости также при низкой концентрации азота (рис. 1, в, кривая 1 и 1, г, кривая 3). При аналогичном микролегировании стали с большим (0,015 %) содержанием азота, характерного для процесса плавки в дуговой сталеплавильной печи без специальной защиты зеркала ванны, подобного эффекта не наблюдается (рис. 1, в, кривая 2 и рис. 1, д).

Таким образом, наиболее вероятной причиной увеличения прокаливаемости борсодержащей стали 40ГФ, содержащей незначи-

тельное количество азота и микролегированной титаном, а также алюминием, является то, что титан и другие сильные нитридообразующие элементы, соединяясь с азотом, нейтрализуют его, предохраняя бор от образования собственных нитридов.

При содержании азота в пределах 0,010–0,015 %, характерного для металла электродуговой плавки, остаточное количество титана и алюминия в пределах 0,015–0,020 % каждого уже недостаточно для связывания всего азота. В результате часть азота расходуется на обра-

зование нитридов бора, что уменьшает эффект влияния последнего на прокаливаемость марганцовисто-ванадиевой стали, микролегированной бором.

### Заключение

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при микролегировании сталей бором необходимо осуществлять его защиту от влияния растворенных в расплаве газов, таких как кислород и азот, для предотвращения образования стойких соединений, приводящих к уменьшению концентрации «эффективного» бора, который обеспечивает высокую прокаливаемость.

Одним из возможных путей предохранения бора от связывания в прочные соединения, по всей видимости, является увеличение расхода сильных раскислителей и нитридообразующих элементов (до некоторого оптимального количества) или же введение бора в составе комплексных лигатур с защитой зеркала ванны и от вторичного окисления при разливке.

### Литература

1. Kapadia, V.M. *Prediction of the Boron Hardenability Effects in Steel – A Comprehensive Review* / V.M. Kapadia // *Hardenability Concepts with Application to Steel*. – Chicago, AIME, 1977. – P. 448–482.
2. Лякишев, Н.П. *Борсодержащие стали и*

*сплавы* / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Ланно. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.

3. Барадынцева, Е.П. *Влияние микролегирования бором на прокаливаемость сталей* / Е.П. Барадынцева, Н.А. Глазунова, О.В. Роговцова // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3 (84). – С. 70–74.

4. *Influence of Boron on the Hardenability of Unalloyed and Low Alloyed Steel* / A. Deva, S.K. De, V. Kumar et al. // *International Journal of Metallurgical Engineering*. – 2013. – Vol. 2, no. 1. – P. 47–51.

5. *Improving Hardenability of High Thickness Forged Steel Materials by Boron Addition* / S. Mengaroni, P.E. Di Nunzio, S. Neri et al. // *Journal of Material Science and Engineering B*. – 2016. – Vol. 6, no. 3–4. – P. 105–109.

6. Verma, A. *Boron Steel: An Alternative for Costlier Nickel and Molybdenum Alloyed Steel for Transmission Gears* / A. Verma, K. Gopinath, B. Sarkar // *The Journal of Engineering Research*. – 2011. – Vol. 8, no. 1. – P. 12–18.

7. *Новое применение бора в металлургии* / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – № 1 (9). – 2005. – С. 15–17.

8. Панфилова, Л.М. *Технология производства и исследование свойств электростали, микролегированной ванадием и азотом* / Л.М. Панфилова, И.А. Крутикова, Л.А. Смирнов // *Труды XII конгресса сталеплавыльщиков, 22–26 октября 2012, г. Выкса*.

**Мазничевский Александр Николаевич**, ведущий научный сотрудник Лаборатории специальной металлургии, ООО «Ласмет»; аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; chiefteh@lasmet.ru.

**Гойхенберг Юрий Нафтулович**, д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; goikhenbergyn@susu.ru.

**Сприкут Радий Вадимович**, директор Лаборатории специальной металлургии, ООО «Ласмет», г. Челябинск; mail@lasmet.ru.

*Поступила в редакцию 3 апреля 2017 г.*

## INFLUENCE OF NITROGEN AND NITRIDE-FORMING ELEMENTS ON THE PROPERTIES OF STEEL CONTAINING BORON

A.N. Maznichevskiy<sup>1,2</sup>, chieftch@lasmnet.ru,  
Yu.N. Goykhenberg<sup>2</sup>, goikhenbergyn@susu.ru,  
R.V. Sprikut<sup>1</sup>, mail@lasmnet.ru

<sup>1</sup> LLC "Lasmnet", Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The influence of concentration of nitrogen dissolved in the steel and the small additions of nitride-forming elements on the hardenability of boron-treated manganese-vanadium steel 40GF-VI was studied. It is shown that an increase of nitrogen concentration from 0.004 % to 0.015 % increases the hardenability of steel. It has been found that a small amount of titanium (about 0.02 %) in steel with a low content of nitrogen (0.004 %) is enough to bind the latter to nitrides, which allows to save most of the boron in the active state (in the solid solution). The residual amount of titanium and aluminum in the range of 0.015–0.020 % of each in steel with nitrogen content in the range of 0.010–0.015 %, which is typical for an electric arc melting steel, is insufficient to bind all nitrogen. As a result, a part of nitrogen is spent on the formation of boron nitrides, which reduces the effect of boron on hardenability of the manganese-vanadium steel micro-alloyed with boron. In conclusion, some methods of protecting boron in steel are briefly described.

*Keywords:* boron-treated steel; boron; nitrogen; hardenability; improvement of steel properties.

### References

1. Kapadia B.M. Prediction of the Boron Hardenability Effects in Steel – A Comprehensive Review. *Hardenability Concepts with Application to Steel*. Doane D.V., Kirkaldy J.S. (Eds.). Chicago, AIME, 1977, pp. 448–482.
2. Lyakishev N. P., Pliner Yu. L., Lappo S. I. *Boron-Treated Steels and Alloys*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 192 p.
3. Baradintzeva E.P., Glazunova N.A., Rogovtseva O.V. [Influence of Microalloying with Boron on the Steel Hardenability]. *Lit'ye i metallurgiya*, 2016, no. 3 (84), pp. 70–74.
4. Deva A., De S.K., Kumar V., Deepa M., Jha B.K. Influence of Boron on the Hardenability of Unalloyed and Low Alloyed Steel. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 47–51. DOI: 10.5923/j.ijmee.20130201.07
5. Mengaroni S., Di Nunzio P.E., Neri S., Calderini M., Di Schino A. Improving Hardenability of High Thickness Forged Steel Materials by Boron Addition. *Journal of Material Science and Engineering B*, 2016, vol. 6, no. 3–4, pp. 105–109. DOI: 10.17265/2161-6221/2016.3-4.00
6. Verma A., Gopinath K., Sarkar B. Boron Steel: An Alternative for Costlier Nickel and Molybdenum Alloyed Steel for Transmission Gears. *The Journal of Engineering Research*, 2011, vol. 8, no. 1, pp. 12–18. DOI: 10.24200/tjer.vol8iss1pp12-18
7. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhigarev M.A. [A New Application of Boron in Metallurgy]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2005, no. 1 (9), pp. 15–17. (in Russ.)
8. Panfilova L. M., Krutikova I. A., Smirnov L. A. [Production Technology and Study of Properties of Steel Micro-Alloyed with Vanadium and Nitrogen]. *Trudy XII kongressa staleplavil'shchikov* [Proceedings of the XII Congress of Steelmakers]. Vyksa, 2012.

*Received 3 April 2017*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Мазничевский, А.Н. Влияние азота и нитридообразующих элементов на прокаливаемость борсодержащей стали / А.Н. Мазничевский, Ю.Н. Гойхенберг, Р.В. Сприкут // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 47–51. DOI: 10.14529/met170206

### FOR CITATION

Maznichevskiy A.N., Goykhenberg Yu.N., Sprikut R.V. Influence of Nitrogen and Nitride-Forming Elements on the Properties of Steel Containing Boron. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 47–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/met170206