

УДК 669.14

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С–У, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ*

Бабенко А.А., д.т.н., ведущий научный сотрудник (babenko@gmail.com)

Жучков В.И., д.т.н., главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)

Сельменских Н.И., научный сотрудник

Уполовникова А.Г., к.т.н., старший научный сотрудник (upol.ru@mail.ru)

Институт металлургии УрО РАН

(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Приведены результаты анализа влияния микролегирования бором на структуру и свойства трубной стали марки 17Г1С-У. Исследования структуры металла выполнены методами электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа. Установлено, что металл, содержащий 0,006 % бора, характеризуется повышенной (до 0,029 %) объемной концентрацией оксидных и окисульфидных включений, содержание которых в металле без бора достигает 0,006 %. При этом в металле с бором, содержащем 0,003 % серы, практически отсутствуют отдельные сульфидные включения, концентрация которых не превышает 0,004 % против 0,029 % в металле без бора, содержащем 0,01 % серы. Микролегирование трубной стали бором обеспечило преимущественное формирование мелких неметаллических включений, равномерно распределенных в объеме металла. Доля неметаллических включений размером не более 2 мкм составляет 76,1 %, тогда как в стали без бора только 58,5 %. При этом крупные неметаллические включения размером более 10 мкм в образце с бором практически отсутствуют; их доля не превышает 0,6 %, что в 22 раза меньше их количества в образце без бора. Структура образца без бора состоит преимущественно из феррита и небольшого количества перлита, а образец с бором представлен дисперсной феррито-бейнитной структурой. При добавлении бора в сталь наблюдается повышение микротвердости как феррита, так и перлита на 80 и 100 HV10 соответственно. Горячекатаный металлопрокат из борсодержащей трубной стали 17Г1С-У толщиной 10 мм благодаря формированию преимущественно мелких неметаллических включений и мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры характеризуется повышенными прочностными свойствами с сохранением пластических характеристик. Абсолютные значения предела текучести и временного сопротивления металлопроката трубной стали, содержащей 0,006 % В и 0,003 % S, достигают без термообработки 585 и 685 МПа соответственно и отвечают классу прочности X80; сохраняются достаточно высокие пластические характеристики. Металлопрокат трубной стали без бора, содержащей 0,01 % S, относится к классу прочности X70 и характеризуется пониженными до 540 и 610 МПа пределом прочности и временным сопротивлением соответственно.

Ключевые слова: трубная сталь, бор, сера, марганец, неметаллические включения, структура, механические свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-774-779

ВВЕДЕНИЕ

Сталь была и остается основным конструкционным материалом, объемы производства и потребления которого значительно превышают альтернативные материалы. Требования к уровню и стабильности технологических, служебных и качественных характеристик металлопродукции постоянно растут, за последние 5 – 10 лет они увеличились в несколько раз [1 – 3]. При этом важной особенностью является необходимость одновременного достижения предельно высокого уровня целого комплекса свойств, часто трудно сочетаемых, таких как прочность и пластичность, штампуемость и коррозионная стойкость.

Сегодня наряду с глубокой десульфурацией стали [3 – 7] перспективным направлением достижения высокого уровня перечисленных выше свойств является микролегирование стали [8 – 16]. Например, микролегирование стали бором, введение которого в металл

в количестве 0,001 – 0,005 % (по массе) позволяет достигать одновременно повышения прочности без снижения пластичности при экономии дефицитных дорогостоящих легирующих элементов, таких как молибден, марганец, хром, никель и др. [10 – 13]. В процессе работы установлена высокая эффективность воздействия оптимальных микродобавок бора на структурообразование сталей. Показано, что образование твердого раствора бора в сталях позволяет формировать бейнитную структуру даже при низких скоростях охлаждения штрипса после прокатки [14], при этом повышаются прочностные свойства стали, которые могут соответствовать свойствам стали класса прочности X90 и даже X100. В работе [15] за счет дополнительного микролегирования стали бором удалось создать трубную сталь класса прочности X120. Кроме того, установлено положительное влияние микродобавок бора на измельчение зерна низкоуглеродистой стали типа Mn–Mo–Nb–Ti–B, обладающей высокой ударной вязкостью [16], структура такой стали преимущественно состоит из нижнего бейнита.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10435).

Химический состав опытной и сравнительной плавок трубной стали 17Г1С-У

Table 1. Chemical composition of experimental and comparative melting of 17G1S-U pipe steel

Варианты выплавки стали	Содержание элементов, % (по массе)												
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti	N	Al	B
без бора	0,06	1,4	0,23	0,010	0,014	0,02	0,04	0,04	0,06	0,02	0,005	0,05	0
с бором	0,06	1,4	0,17	0,003	0,014	0,02	0,04	0,07	0,06	0,02	0,006	0,03	0,006

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по выплавке борсодержащей трубной стали марки 17Г1С-У проводили в соответствии с технологическими инструкциями по выплавке стали в кислородных конвертерах из фосфористых чугунов [17] и внепечной обработки стали для слабовых МНЛЗ [18] с соблюдением рекомендованных расходов шлакообразующих материалов и раскислителей [19, 20]. В табл. 1 приведен химический состав плавок трубной стали, используемой для исследования структуры и свойств металлопроката.

Исследования структуры образцов трубной стали 17Г1С-У проводили методами электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа с помощью оптического (Olympus) и растрового электронного (JSM-59000LV) микроскопов, а рентгеноспектральный микроанализ – на энергодисперсионном рентгеновском спектрометре INCA Energy 200. Величину зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 (п. 3.5.4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полученных образцах трубной стали выделены три основные группы неметаллических включений: оксисульфидные включения (ОСВ), оксидные включения (ОВ) и сульфидные включения (СВ). Самостоятельные борсодержащие включения в образцах трубной стали не выявлены. Не обнаружен бор и в выделенных неметаллических включениях. Металл, содержащий 0,006 % бора, характеризуется повышенной до 0,029 % объемной концентрацией ОВ и ОСВ, концентрация которых в металле, не содержащем бор, достигает 0,006 %. При этом в металле с бором, содержащем 0,003 % серы, практически отсутствуют отдельные СВ, содержание которых не превышает 0,004 % против 0,029 % в металле без бора, содержащем 0,02 % серы (табл. 2).

Микролегирование трубной стали бором обеспечило преимущественное формирование мелких неметаллических включений, равномерно распределенных в объеме металла. Доля неметаллических включений размером не более 2 мкм составляет 76,1 %, тогда как в стали без бора только 58,5 %. При этом крупные

неметаллические включения размером более 10 мкм в образце с бором практически отсутствуют. Их доля не превышает 0,6 %; это в 22 раза меньше их количества в образце без бора.

Мелкие включения размером не более 2 мкм, присутствующие в трубной стали с бором, являются силикатными стеклами с оксидами железа и марганца и округлыми оксисульфидами. Отдельные СВ не были выявлены. В образце с бором характерные ОСВ (1) состоят из алюмомагниевого шпинели ($Al_2O_3 \cdot MgO$) с небольшим содержанием сульфидов кальция и марганца и ОВ (2) и (3), содержат SiO_2 , FeO и MnO (рис. 1). При этом, как отмечают авторы работы [21], наличие мелких, равномерно распределенных в металле силикатных и оксисульфидных включений улучшает прочностные свойства стали.

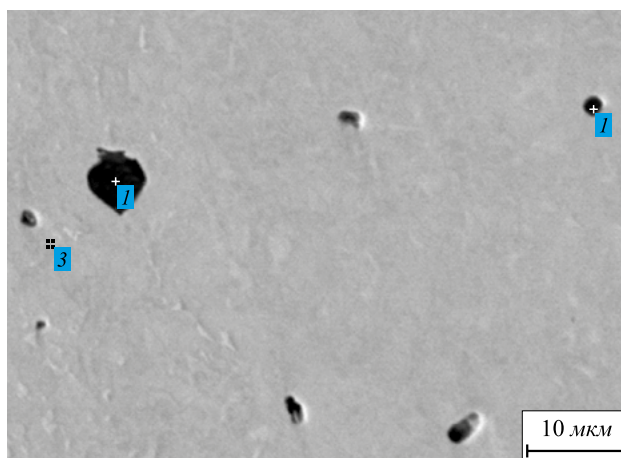
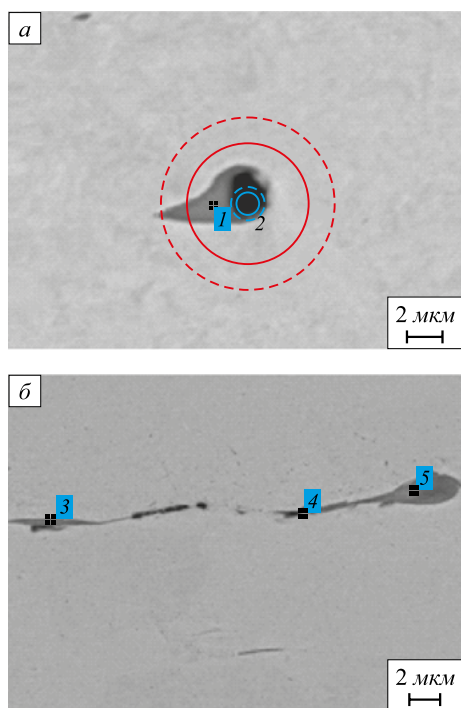
Образец стали без бора, содержащей 0,01 % S, содержит ОСВ, ОВ и отдельные СВ (рис. 2). Оксидная часть ОСВ представлена в виде округленного недеформированного (2) или слегка деформированного (5) включения, что соответствует алюмомагниевого шпинели. Сульфидные включения (1) состоят в основном

Неметаллические включения в металлопрокате трубной стали 17Г1С-У*

Table 2. Nonmetallic inclusions in rolled metal of 17G1S-U pipe steel

Показатель	Варианты выплавки стали	
	с бором	без бора
Содержание, % (по массе)		
B	0,006	0
Mn	1,400	1,4
Объемная концентрация, %		
ОСВ и ОВ	0,0294	0,0062
СВ	0,0038	0,0290
Доля НВ, %, размером		
0 – 2 мкм	76,1	58,5
2 – 5 мкм	22,6	22,1
5 – 10 мкм	0,7	5,8
более 10 мкм	0,6	13,6

* В работе принимали участие В.П. Ермакова и В.Г. Смирнова.



Спектр	Содержание элементов, % (по массе)							
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	48,88	16,68	42,45	—	1,18	0,97	0,48	2,61
2	8,69	—	—	5,17	—	—	1,69	92,15
3	3,71	—	—	1,69	—	—	1,51	95,04

Рис. 2. Комплексные окисульфидные включения (1) с оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпиннели с небольшим содержанием серы и отдельных оксидных включений (2) и (3) и их химический состав

Fig. 2. Complex oxysulfide inclusions (1) with an oxide component based on aluminomagnesium spinel with a small sulfur content and individual oxide inclusions (2) and (3) and their chemical composition

Спектр	Содержание элементов, % (по массе)							
	O	Mg	Al	S	Ca	Ti	Mn	Fe
1	—	1,51	2,02	33,98	2,12	—	47,87	12,50
2	44,36	8,27	36,77	4,19	—	0,45	3,83	2,14
3	—	—	—	4,10	—	—	7,13	88,77
4	—	—	—	1,63	—	—	4,21	94,16
5	12,29	1,06	20,72	21,98	—	1,12	39,72	3,11

Рис. 1. Комплексные окисульфидные включения с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпиннели (2) и (5) и сульфидной составляющей больших (1) и малых (3, 4) размеров и их химический состав

Fig. 1. Complex oxysulfide inclusions with the initial oxide component based on aluminum magnesium spinel (2) and (5) and the sulphide component of large (1) and small (3, 4) dimensions and their chemical composition

из сульфидов марганца с небольшой долей сульфидов кальция, имеют вытянутый в направлении прокатки вид. Основная часть ОСВ имеет размер 3 – 8 мкм. Отдельные СВ (3, 4) являются сульфидами марганца и представлены в виде пленок толщиной 1,5 мкм и длиной от 4 до 100 мкм, вытянутых в направлении прокатки.

Структура образца стали, не содержащей бора, состоит преимущественно из феррита и небольшого количества перлита (рис. 3, а), а образец стали, содержащий бор, состоит из дисперсной феррито-бейнитной структуры, которая представлена мелкозернистым ферритом с участками бейнита (рис. 3, б). Отмечено уменьшение в трубной стали, микролегированной бором, размера ферритного зерна с 8,7 до 6,2 мкм и повышение микротвердости как феррита, так и перлита на 80 и 100 HV₁₀ (табл. 3). Это обусловлено, по-видимому, тем, что бор является достаточно активным элементом и поэтому сегрегирует первым на межфазных

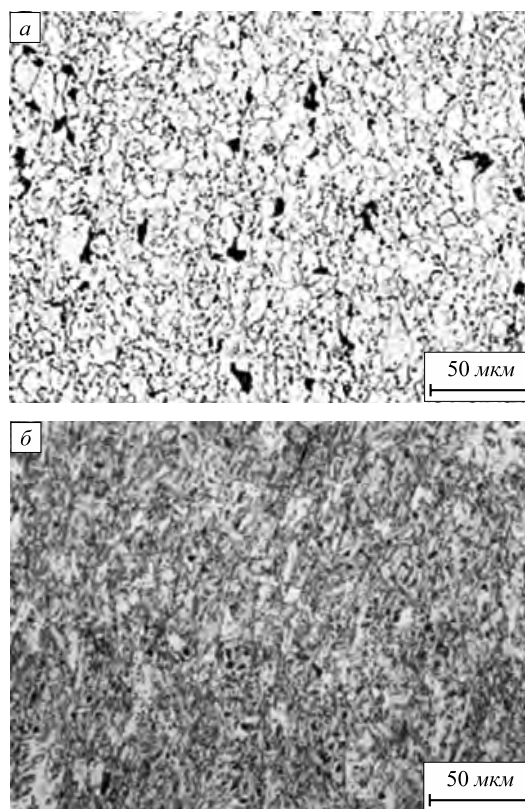


Рис. 3. Микроструктура образцов трубной стали без бора (а) и с содержанием 0,006 % бора (б)

Fig. 3. Microstructure of the samples of pipe steel without boron (a) and containing 0.006 % boron (b)

Т а б л и ц а 3

**Размер зерна феррита и микротвердость
структурных фаз опытного и сравнительного металла
(средние значения)**

Table 3. Ferrite grain size and microhardness of structural phases of the experimental and comparative metal

Варианты выплавки стали	Микротвердость, HV ₁₀		Размер зерна феррита, мкм
	перлит (бейнит)	феррит	
Без бора	214	180	8,7
С бором	314	260	7,2

границах, что способствует увеличению концентрации и равномерности распределения углерода в объеме зерен и приводит к повышению дисперсности и твердости исследуемых структур опытного металла.

Механические свойства металлопроката толщиной 10 мм из борсодержащей трубной стали 17Г1СУ благодаря преимущественному формированию мелких включений размером не более 2 мкм, представленных ОВ (силикатные стекла) и комплексными ОСВ с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпинели с небольшим содержанием СВ на поверхности шпинели, отсутствию обособленных СВ и формированию мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры, характеризуются повышенными значениями прочностных свойств с сохранением пластических характеристик (табл. 4). Абсолютные значения предела текучести и временного сопротивления опытного металлопроката трубной стали, содержащей 0,006 % В и 0,003 % S, достигают без термообработки 585 и 685 МПа соответственно и отвечают классу прочности Х80 без термической обработки. При таких прочностных свойствах металлопроката сохраняются достаточно высокие пластические характеристики. Металлопрокат сравнительной плавки труб-

ной стали без бора, содержащей 0,01 % S, относится к классу прочности Х70 и характеризуется пониженным до 540 и 610 МПа пределом прочности и временным сопротивлением соответственно.

Выводы

Микролегирование трубной стали 17Г1С-У бором благодаря преимущественному формированию мелких включений размером не более 2 мкм, представленных ОВ (силикатные стекла) и комплексными ОСВ с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпинели с небольшим содержанием СВ на поверхности шпинели, отсутствию обособленных СВ и формированию мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры, обеспечивает без термической обработки высокие прочностные свойства металлопроката, отвечающие классу прочности Х80 с сохранением высоких пластических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Углов В.А., Зайцев А.Н. Основные направления развития металлургической технологии для обеспечения современных требований по уровню и стабильности и служебных свойств стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2012. № 3. С. 85 – 93.
2. Шахпазов Е.Х., Зайцев А.И., Родионова И.Г. Современные проблемы металлургии и материаловедения стали // Металлург. 2009. № 4. С. 25 – 31.
3. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 3 – 10.
4. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Вспечная металлургия стали. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 с.
5. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО «Северсталь» с учетом технологических аспектов. – В кн.: Труды VI конгресса сталеплавателей. – М.: АО «Черметинформация», 2001. С. 63 – 66.
6. Соколов Г.А. Вспечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.

Т а б л и ц а 4

Механические свойства исследованных образцов металлопроката трубной стали 17Г1С-У

Table 4. Mechanical properties of the studied samples of rolled metal of 17G1S-U pipe steel

Показатель	Вариант выплавки стали		Стандарты		
	с бором	без бора	K60**	X70*	X80*
Содержание, %					
В	0,006	0			
Mn	1,40	1,40			
Предел текучести, МПа	585	540	412	485 – 635	555 – 705
Временное сопротивление, МПа	685	610	588 – 735	570 – 760	625 – 825
Относительное удлинение, %	19,7	25,0	16	–	–

Примечание. Одной и двумя звездочками обозначены стандарт (США) API Spec 5L и ГОСТ 20295 – 85 (Россия).

7. Nurhudin, Maulud Hidagat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultra low sulfur steel at PT Krakatau Steel // SEA&S& Quarterly. 2004. Vol. 33. No. 2. P. 29 – 34.
8. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
9. Пилюшенко В.Л., Вихлещук В.А. Научные и технологические основы микролегирования стали. – М.: Металлургия, 2000. – 384 с.
10. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 191 с.
11. Софрыгина О.А., Жукова С.Ю., Битюков С.М., Пышминцев И.Ю. Разработка экономно-легированных сталей для изготовления высокопрочных труб нефтяного сортамента по API Spec5CT // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 43 – 49.
12. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А., Сычев А.В., Акбердин А.А., Ким А.С., Витушенко М.Ф., Добромилов А.А. Исследование и разработка комплексной технологии производства низкоуглеродистой борсодержащей стали с низким содержанием серы // Сталь. 2015. № 11. С. 48 – 50.
13. Мачикин В.И., Маняк Н.А., Маняк Л.К., Мелак А.Г., Акулов В.В., Волкова В.В. Бор и неметаллические включения в низколегированной стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1986. № 3. С. 15, 16.
14. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F., Hillenbrand H.-G., Jansen J.-P. / Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe // Ironmaking and Steelmaking. 2005. Vol. 32. No. 4. P. 337 – 341.
15. Patent 6228183 US. Ultra-high strength, weldable, boron-containing steels with superior toughness / Bangaru Narasimha-Rao V., Koo Jayoung, Luton Michael J., et al. Publ. 08.05.01.
16. Асахи Х., Хаара Т., Тзуру Е. и др. Разработка ультравысокопрочных труб Х120 УЕО. – В кн.: Международный семинар «Современные стали для газонефтепроводных труб, проблемы и перспективы»: сб. докладов. – М.: Металлургиздат, 2006. С. 123 – 130.
17. Технологическая инструкция ТИ СК-01–2007 «Выплавка стали в кислородных конвертерах». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
18. Технологическая инструкция ТИ СК-07–2007 «Внепечная обработка стали для слябовых МНЛЗ». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
19. Пат. 2562849 РФ. Шлаковая смесь для обработки стали в ковше / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Е.Н. Селиванов, А.В. Сычев, А.Н. Золин, А.А. Добромилов, Х.Ш. Кутдусова, А.И. Саврасов, А.С. Ким, А.А. Акбердин. Заявл. 11.06.2004; опубли. 10.09.2015. Бюл. № 25.
20. Пат. 30964 Республика Казахстан. Шлаковая смесь для обработки стали в ковше / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Е.Н. Селиванов, А.В. Сычев. 2016.
21. Комплексные неметаллические включения и свойства стали / А.И. Зайцев, В.С. Крапошин, И.Г. Родионова и др. – М.: Металлургиздат, 2015. – 276 с.

Поступила 15 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, PP. 774–779.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF 17G1S–U LOW–CARBON PIPE STEEL MICROALLOYED BY BORON

A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, N.I. Sel'menskikh, A.G. Upolovnikova

Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The results of analysis of the influence of boron microalloying on structure and properties of 17G1S-U pipe steel are given in the paper. Studies of metal structure were performed by electron microscopy and local X-ray spectral analysis. It has been established that metal containing 0.006 % of boron is characterized by an increased volume concentration to 0.029 % of oxide (OS) and oxysulfide (OSB) inclusions, whose content in metal without boron reaches 0.006 %. Separate sulphide inclusions (CB), whose concentration does not exceed 0.004 % against 0.029 % in a metal without boron, containing 0.01 % S is practically absent in the metal with boron containing 0.003 % S. The microalloying of pipe steel by boron has ensured the preferential formation of small nonmetallic inclusions, evenly distributed in the volume of metal. The proportion of nonmetallic inclusions with size less than 2 μm is 76.1 %, whereas in steel without boron it is only 58.5 %. In this case, large nonmetallic inclusions of more than 10 μm are practically absent in the sample with boron. Their share does not exceed 0.6 %, which is 22 times less than their amount in the sample without boron. The structure of the sample without boron consists mainly of ferrite and a small amount of pearlite, and the sample with boron is represented by a dispersed ferritic-bainitic structure. Increasing the microhardness of both ferrite and pearlite 80 and 100 HV10, respectively, is observed by adding boron to steel. The mechanical properties of 10 mm hot rolled metal from boron-containing 17G1S-U pipe steel are characterized by increased strength properties with preservation of plastic characteristics, due to the formation of predominantly small nonmetallic inclusions and a finely dispersed ferritic-bainitic structure. The absolute values of the yield stress and the time resistance of pipe steel containing in

mass %: 0.006 B and 0.003 S are achieved without heat treatment at 585 and 685 MPa, respectively, and meet the X80 strength class, while retaining sufficiently high plastic characteristics. The pipe steel without boron containing 0.01 % of S belongs to the X70 strength class and is characterized by tensile strength lowered to 540 and 610 MPa and a temporary resistance, respectively.

Keywords: pipe steel, boron, sulfur, manganese, non-metallic inclusions, structure, mechanical properties.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-774-779

REFERENCES

1. Uglov V.A., Zaitsev A.N. Main directions of development of metallurgical technology to ensure modern requirements for the level and stability of service characteristics of steel. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 3, pp. 85–93. (In Russ.).
2. Shakhpazov E.Kh., Zaitsev A.I., Rodionova I.G. Current problems in the steel metallurgy and materiology. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 3–4, pp. 187–195.
3. Arabei A.B. Development of technical specifications for pipe-line steels. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 7, pp. 3–10. (In Russ.).
4. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Steel production. 3. Out-of-furnace steel metallurgy]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
5. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D. etc. The concept of production of low-sulfur steels at Severstal OJSC, taking into account its technological aspects. In: *Trudy VI kongressa staleplavil'shchikov* [Proc. of the 6th Congress of Steel Makers]. Moscow: AO "Chermetinformatsiya", 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
6. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinирование stali* [Out-of-furnace steel refining]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).

7. Nurhudin, Maulud Hidagat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultra low sulfur steel at PT Krakatau Steel. *SEA&S& Quarterly*. 2004, vol. 33, no. 2, pp. 29–34.
8. Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i sliikov* [Modification of steel for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporizhia: ZNTU, 2009, 356 p. (In Russ.).
9. Pilyushenko V.L., Vikhleshchuk V.A. *Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy mikrolegirovaniya stali* [Scientific and technological basis of steel microalloying]. Moscow: Metallurgiya, 2000, 384 p. (In Russ.).
10. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchie stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 191 p. (In Russ.).
11. Sofrygina O.A., Zhukova S.Yu., Bityukov S.M., Pyshmintsev I.Yu. Development of HSLA-steels for production of high-strength oil country tubular goods of API Spec5CT. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 7, pp. 43–49. (In Russ.).
12. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Akberdin A.A., Kim A.S., Vitushchenko M.F., Dobromilov A.A. Production technology for low-carbon, low-sulfur boron steel. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 883–886.
13. Machikin V.I., Manyak N.A., Manyak L.K., Melakh A.G., Akulov V.V., Volkova V.V. Boron and non-metallic inclusions in low-alloy steel. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1986, no. 3, pp. 15–16. (In Russ.).
14. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F., Hillenbrand H.-G., Jansen J.-P. Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 4, pp. 337–341.
15. Vangaru Narasimha-Rao V., Koo Jayoung, Luton Michael J., etc. *Ultra-high strength, weldable, boron-containing steels with superior toughness*. Patent 6228183 US. Publ. 08.05.2001.
16. Asakhi Kh., Khaara T., Tzuru E., etc. *Razrabotka ul'travysokoprochnykh trub X120 UEO* [Development of ultra-high-strength X120 UEO pipes]. In: *Mezhdunarodnyi seminar "Sovremennye stali dlya gazonefteprovodnykh trub, problemy i perspektivy": sb. dokladov* [Int. seminar "Modern steels for gas and oil pipes, problems and prospects": Coll. of papers]. Moscow: Metallurgizdat, 2006, pp. 123–130. (In Russ.).
17. *Tekhnologicheskaya instruktsiya TI SK-01–2007 "Vyplavka stali v kislorodnykh konverterakh"* [TI SK-01-2007 technological instruction "Steel melting in oxygen converters"]. Temirtau: AO "Arselor-Mittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
18. *Tekhnologicheskaya instruktsiya TI SK-07–2007 "Vnepechnaya obrabotka stali dlya slyabovykh MNLZ"* [TI SK-07-2007 technological instruction "Out-of-furnace processing of steel for slab CCM"]. Temirtau: AO "ArselorMittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
19. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N., Sychev A.V., Zolin A.N., Dobromilov A.A., Kutdusova Kh.Sh., Savrasov A.I., Kim A.S., Akberdin A.A. *Shlakovaya smes' dlya obrabotki stali v kovshe* [Slag mixture for steel processing in a ladle]. Patent no. 2562849 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2004, no. 25. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N., Sychev A.V. *Shlakovaya smes' dlya obrabotki stali v kovshe* [Slag mixture for steel processing in a ladle]. Patent no. 30964 RK. 2016. (In Russ.).
21. Zaitsev A.I., Kraposhin V.S., Rodionova I.G., etc. *Kompleksnye nemetallicheskie vklyucheniya i svoystva stali* [Complex non-metallic inclusions and properties of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 276 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The research was financially supported by RNF grant (project no. 16-19-10435).

Information about the authors:

Babenko A.A., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher
(babenko251@gmail.com)

Zhuchkov V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher
(ntm2000@mail.ru)

N.I. Sel'menskikh, Research Associate

Upolovnikova A.G., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(upol.ru@mail.ru)

Received May 15, 2018