



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>  
УДК 669

Поступила 18.11.2020  
Received 18.11.2020

## ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН НЕСООТВЕТСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ДЕТАЛЯХ ИЗ БОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ СТАЛИ

Т. И. СИДОРЕНКО, В. И. ВОЗНАЯ, А. В. РАДИОНОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: izm.czl@bzm.gomel.by

Большое распространение в качестве деталей машин, конструкций и механизмов получили крепежные изделия. В качестве материала в производстве используют среднеуглеродистые легированные стали и легированные борсодержащие стали. Борсодержащие стали имеют хорошее сочетание прочностных и пластических свойств, а также высокий уровень прокаливаемости. В данной статье описаны исследовательские работы, проведенные в лаборатории, и рассмотрены причины получения низких значений физико-механических параметров деталей, изготовленных на предприятиях-конкурентах. Определены качественные характеристики металла. Представлены результаты химических, физико-механических и металлографических испытаний, а также результаты химического состава неметаллических включений. Рассмотрены причины несоответствия механических свойств в борсодержащих сталях. Определена зависимость введения в сталь таких химических элементов, как азот, титан, алюминий. Описаны возможность оценки содержания «эффективного бора» на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», а также математическая модель, используемая на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», позволяющая провести теоретический расчет величины «эффективного» бора. Даны рекомендации по усовершенствованию технологического процесса выплавки борсодержащих сталей.

**Ключевые слова.** Алюминий, бор, металл, неметаллические включения, прочность, сталь, структура, твердость, титан, эффективный бор.

**Для цитирования.** Сидоренко, Т. И. Выявление причин несоответствия механических свойств в деталях из борсодержащей стали / Т. И. Сидоренко, В. И. Возная, А. В. Радионов // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>.

## IDENTIFICATION OF REASONS FOR NON-COMPLIANCE OF MECHANICAL PROPERTIES IN BORON-CONTAINING STEEL PARTS

T. I. SIDORENKO, V. I. VOZNAYA, A. V. RADIONOV, OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”, Zhlobin City, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: izm.czl@bzm.gomel.by

Fasteners are widely used as machine parts, structures and mechanisms. Medium-carbon alloy steels and boron-containing alloy steels are used as materials in production. Boron-containing steels have a good combination of strength and plastic properties, as well as a high level of hardenability. This article describes the research work carried out in the laboratory, and considers the reasons for obtaining low values of physical and mechanical parameters of parts manufactured at competitive enterprises. The qualitative characteristics of the metal are determined. The results of chemical, physical-mechanical and metallographic tests, as well as the results of the chemical composition of non-metallic inclusions are presented. The reasons for the discrepancy of mechanical properties in boron-containing steels are considered. The dependence of the introduction of chemical elements into steel: nitrogen, titanium, aluminum is determined. The possibility of evaluating the content of “effective boron” at OJSC “BSW” – the Management Company of the Holding “BMC” is described. The mathematical model used at OJSC “Oskol electrometallurgical combine”, which allows to carry out a theoretical calculation of the value of “effective” boron, is described. Recommendations for improving the technological process of smelting boron-containing steels are given.

**Keywords.** Aluminum, boron, metal, non-metallic inclusions, strength, steel, structure, hardness, titanium, effective boron.

**For citation.** Sidorenko T. I., Voznaya V. I., Radionov A. V. Identification of reasons for non-compliance of mechanical properties in boron-containing steel parts. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 78–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-78-85>.

Метизные изделия получили большое распространение в качестве деталей машин, конструкций и механизмов. Современное производство метизных изделий осуществляется двумя способами: горячей либо холодной штамповкой и последующим точением. Свойства метизов и их эксплуатационные показатели формируются на всех стадиях металлургического передела [1].

В качестве основных материалов для производства метизных изделий используют среднеуглеродистые легированные стали (марки 40, 40X, 38ХГНМ) и легированные борсодержащие стали (12Г1Р, 20Г2Р, 30Г1Р, 20MnB4, 30MnB4, 32CrB4), занимающие значимое место в марочнике ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Борсодержащие стали имеют определенные преимущества в использовании. Несмотря на меньшее содержание углерода и легирующих элементов в своем химическом составе, что обуславливает снижение их себестоимости, они имеют хорошее сочетание прочностных свойств с более высокой технологической пластичностью, а также высокий уровень прокаливаемости.

Объектом исследования явились изделия в виде стержней с наружной резьбой (шпилек), изготовленных из катанки борсодержащих сталей марок 30MnB4 и 20Г2Р после испытания на прочность. В центральной заводской лаборатории БМЗ на образцах шпилек был проведен комплекс испытаний, включающий определение химического состава, числа твердости и микроструктурное исследование.

### Шпильки из катанки стали марки 30MnB4

Предпосылкой исследования шпилек из катанки стали марки 30MnB4 явилось выявление производителем метизов несоответствий механических свойств готовых изделий (прочности) и твердости после закалки.

В процессе приложения растягивающей нагрузки при определении прочности шпильки на стержне образуется шейка. Для исследования взяты четыре образца шпилек после испытания на растяжение, в результате которых в двух случаях образование шейки произошло на резьбовой части стержня (образцы № 1, 2) и в двух случаях – на гладкой части стержня (образцы № 3, 4). Внешний вид шпилек после испытания на растяжение показан на рис. 1.

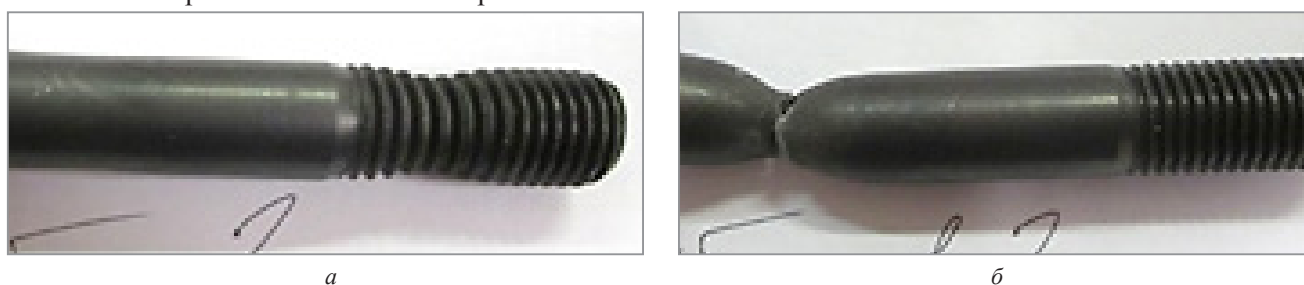


Рис. 1. Внешний вид шпилек после испытания на растяжение:

*a* – с сужением на резьбовой части стержня, образец № 1; *б* – с сужением на гладкой части стержня, образец № 3

При определении химического состава шпилек установлено, что массовая доля химических элементов в материале всех исследованных образцов соответствует стали марки 30MnB4. Для проверки влияния на механические свойства химической неоднородности в образце № 4 массовая доля химических элементов была определена на резьбой и гладкой частях стержня. При этом различий в химическом составе не выявлено. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты испытания химического состава материала шпилек

Номер образца	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	Ti	B
1	0,295	0,194	0,858	0,008	0,007	0,044	0,022	0,107	0,035	0,0029
2	0,294	0,195	0,852	0,008	0,008	0,043	0,023	0,106	0,035	0,0031
3	0,291	0,194	0,859	0,008	0,007	0,043	0,022	0,108	0,035	0,0025
4 (резьбовая часть стержня)	0,294	0,193	0,852	0,008	0,008	0,046	0,023	0,104	0,035	0,0032
4 (гладкая часть стержня)	0,299	0,196	0,856	0,008	0,008	0,047	0,023	0,104	0,035	0,0032
Требования для стали марки 30MnB4	0,27–0,32	≤0,30	0,80–1,10	≤0,020	≤0,015	≤0,30	–	≤0,20	0,035–0,050	0,002–0,004

При определении числа твердости по Роквеллу и Виккерсу на шпильках получена следующая зависимость: на образцах № 3, 4 (изделия с низкой прочностью и сужением на гладкой части стержня) твердость гладкой части стержня ниже требований нормативной документации, резьбовой – соответствует требованиям; на образцах № 1, 2 (изделия с удовлетворительной прочностью и сужением на резьбовой части стержня) твердость в обоих случаях соответствует требованиям нормативной документации. Результаты испытаний приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Результаты по определению числа твердости по Роквеллу

Номер образца	Твердость HRC	
	гладкая часть стержня	резьбовая часть стержня
1	28,3	30,3
2	28,7	31,0
Требования	22–32	
3	27,6	33,6
4	28,3	34,2
Требования	32–39	

Таблица 3. Результаты по определению числа микротвердости по Виккерсу

Номер образца	Твердость HV <sub>1</sub>	
	гладкая часть стержня	резьбовая часть стержня
1	288	288
2	276	301
Требования	250–320	
3	274	326
4	292	377
Требования	320–380	

При исследовании микроструктуры образцов № 3, 4 (изделия с низкой прочностью и сужением на гладкой части стержня) отмечена ее неоднородность по длине стержня. Микроструктура резьбовой части стержня представляет собой мартенсит (99–100%) с незначительным количеством остаточного аустенита (менее 1%), микроструктура гладкой части стержня – смесь мартенсита (70%), пластинчатого перлита (20%) и игольчатого феррита (10%).

В микроструктуре образцов № 1, 2 (изделия с удовлетворительной прочностью и сужением на резьбовой части стержня) различий в содержании структурных составляющих в гладкой и резьбовой части стержней не выявлено. Микроструктура всего стержня представляет собой мартенсит (99–100%) с незначительным количеством остаточного аустенита (менее 1%).

Микроструктура шпилек после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте показана на рис. 2, 3.

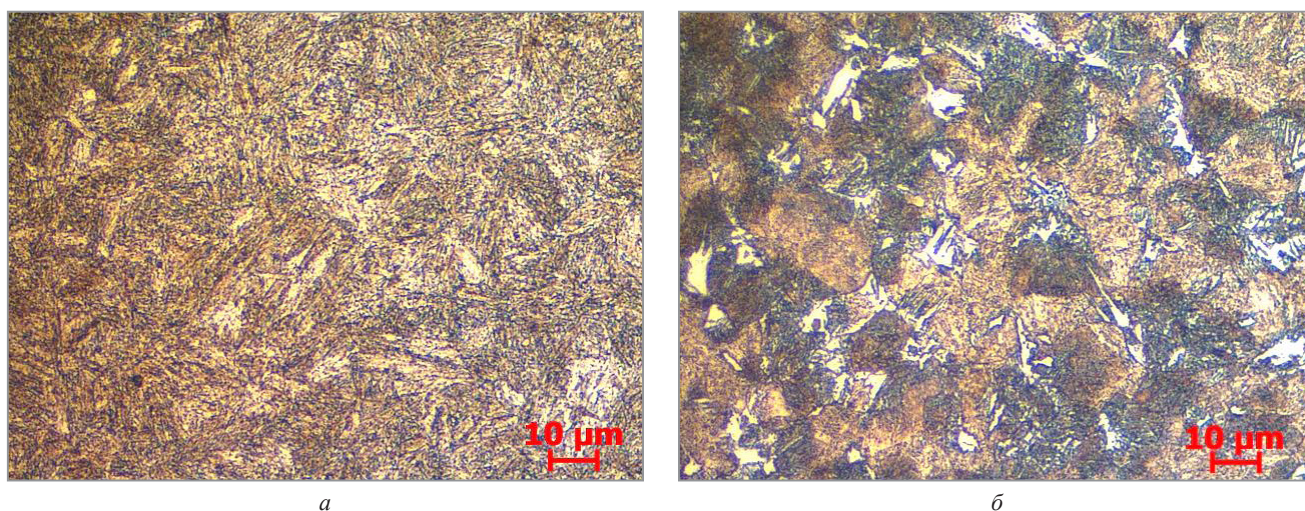


Рис. 2. Микроструктура шпильки № 3: а – резьбовая часть стержня. x100; б – гладкая часть стержня. x100

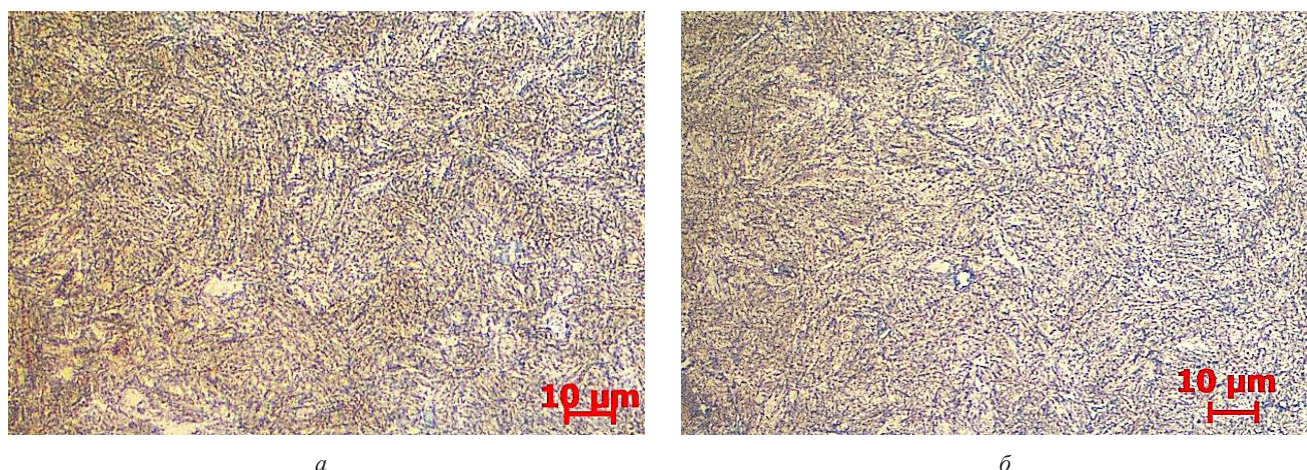


Рис. 3. Микроструктура шпильки № 1: *a* – резьбовая часть стержня.  $\times 100$ ; *б* – гладкая часть стержня.  $\times 100$

### Шпильки из катанки стали марки 20Г2Р

Шпильки изготавливали из катанки стали марки 20Г2Р в соответствии с требованиями нормативной документации. При испытании производителем были выявлены несоответствия требованиям при определении твердости после закалки и механических свойств. Для испытаний были выбраны и замаркированы шпильки № 1, 2.

#### Химический состав

Для определения соответствия марки стали был определен химический состав шпилек (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Результаты химического анализа шпилек

Образец	Массовая доля химических элементов, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Al	Ti	B	N <sub>2</sub>
Шпилька № 1	0,208	0,212	0,967	0,0067	0,0077	0,159	0,096	0,025	0,034	0,0037	0,0081
Шпилька № 2	0,207	0,212	0,966	0,0067	0,0083	0,160	0,096	0,025	0,034	0,0037	0,0081
Требования	0,17– 0,24	0,17– 0,35	0,9–1,3	max 0,035	max 0,035	max 0,25	–	0,01– 0,05	max 0,06	0,003– 0,005	max 0,012

Как видно из таблицы, массовая доля химических элементов соответствует стали марки 20Г2Р.

#### Физико-механические параметры

Результаты по определению механических параметров, числа твердости после закалки приведены в табл. 5, 6.

Т а б л и ц а 5. Результаты испытаний на растяжение

Образец	Прочность, Н/мм <sup>2</sup>	Место образования сужения
Шпилька № 1	769	Гладкая часть стержня
Шпилька № 2	897	Резьбовая часть стержня
Требования	Не менее 800	–

Т а б л и ц а 6. Результаты по определению числа твердости по Роквеллу

Образец	Состояние шпильки	Твердость HRC					
		гладкая часть стержня			резьбовая часть стержня		
Шпилька № 1	После испытания – шейка на гладкой части стержня	15,0	15,0	15,0	26,5	28,0	28,0
Шпилька № 2	После испытания – шейка на резьбовой части стержня	24,5	23,0	23,5	28,0	28,5	28,5
Требования		22–32					

Как видно из таблиц, прочность и твердость шпильки № 1 на гладкой части стержня не соответствуют требованиям.

### Металлографические параметры

Исследование микроструктуры шпилек проводили на поперечных микрошлифах. Схема исследования показана на рис. 4. Микроструктуру всех образцов исследовали у поверхности и в центральной части после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте (рис. 5, 6).

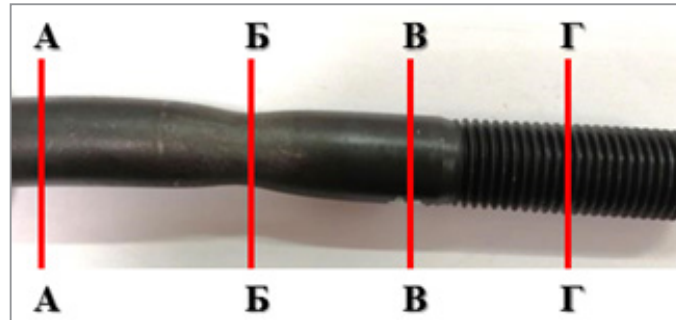


Рис. 4. Схема исследования микроструктуры шпильки

№ образца	Гладкая часть стержня	Гладкая часть стержня в зоне сужения	Гладкая часть стержня вблизи резьбы	Резьбовая часть стержня
1	2	3	4	5
1.2 Край Поперечное сечение, x200				
	M15% + Б + П + Ф	M15% + Б + П + Ф	M15% + Б + П + Ф	M-100%
1.2 Центр Поперечное сечение, x200				
	M10% + Б + П + Ф	M10% + Б + П + Ф	M10% + Б + П + Ф	M-100%

Рис. 5. Микроструктура шпильки № 1 с сужением на гладкой части стержня

№ образца	Гладкая часть стержня	Гладкая часть стержня в середине длины	Гладкая часть стержня вблизи резьбы	Резьбовая часть стержня в зоне сужения
1	2	3	4	5
1.6 Край Поперечное сечение, x200				
	M-98% + Ф	M-98% + Ф	M-98% + Ф	M-100%
1.6 Центр Поперечное сечение, x200				
	M-100%	M-100%	M-100%	M-100%

Рис. 6. Микроструктура шпильки № 2 с сужением на резьбовой части стержня

Из рис. 5 видно, что микроструктура гладкой части стержня представляет собой неоднородную смесь с различным соотношением фаз: мартенсита, бейнита, перлита и феррита. Содержание закаленной фазы (мартенсита) в микроструктуре гладкой части стержня с неудовлетворительными результатами физико-механических испытаний составляет от 10 до 15%.

Из рис. 6 видно, что в микроструктуре гладкой части стержня с удовлетворительными результатами физико-механических испытаний доля закаленной фазы (мартенсита) составляет 98%.

Микроструктура резьбовой части стержня в обоих случаях состоит из 100% мартенсита.

Для выявления причины неудовлетворительных физико-механических параметров шпильки № 1 исследован химический состав неметаллических включений (рис. 7).

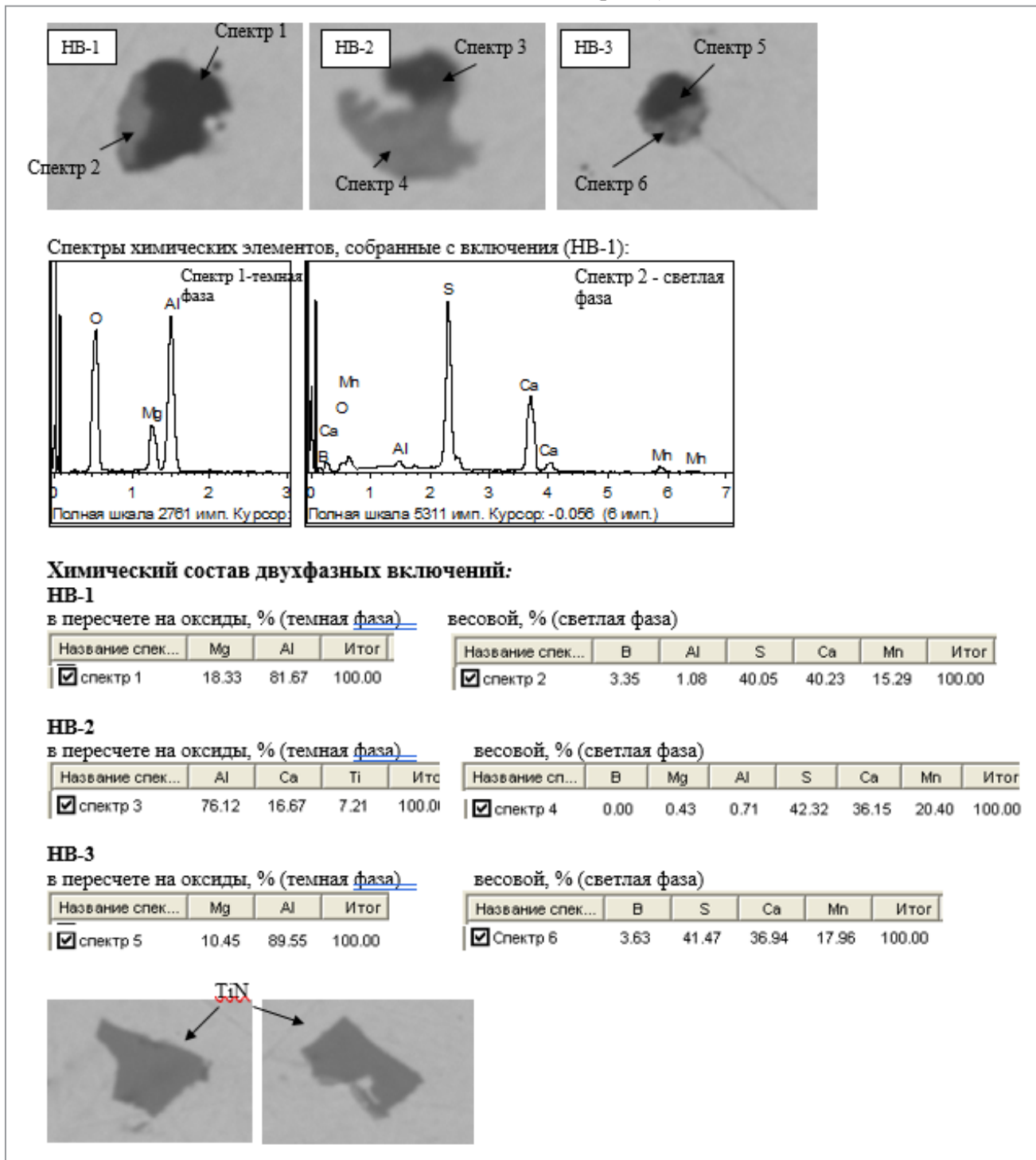


Рис. 7. Результаты исследований неметаллических включений

Результаты исследования химического состава неметаллических включений в образцах показывают, что обнаруженные включения имеют сложный химический состав и представляют собой двухфазные частицы. В составе обнаруженных включений находится бор. Отмечено, что в исследованном образце присутствуют нитриды титана. Из проведенных исследований следует, что часть введенного в сталь бора связана в соединения, входящие в состав неметаллических включений.

В свою очередь, на содержание мартенсита в микроструктуре металла оказывают значительное влияние скорость охлаждения и наличие свободного бора для данной марки стали. Так, в работах [1, 2] отмечено, что у доэвтектоидной стали 20Г2Р, кроме ряда преимуществ, существуют и технологические трудности. К ним относится необходимость предотвращения связывания бора в нитриды при выплавке стали, так как на прокаливаемость стали оказывает влияние не весь присутствующий в стали бор, а только «эффективный» (твердорастворимый, не связанный в нитриды). Нарушение этого условия приводит к нестабильности их свойств и низкому качеству проката из-за невозможности получения необходимой твердости после закалывания [2]. В работе [3] рассмотрено влияние не связанного в нитриды «эффективного» бора на прокаливаемость проката из стали марки 20Г2Р.

Считается, что основным элементом, оказывающим значительное влияние на величину «эффективного» бора, является азот. Образования нитридов бора в этом случае следует избегать, для этого 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 атомного веса титана и азота, а также степень усвоения титана. Для связывания азота и обеспечения наличия в стали «эффективного» бора, кроме титана, вводят алюминий в количестве, обеспечивающем 100%-ную нейтрализацию азота [4–6].

В настоящее время на БМЗ есть возможность определять содержание «эффективного» бора в стали. В образцах с низкими результатами были получены данные, показывающие наличие бора в связанном состоянии. Следует отметить, что это единственное предприятие в Республике Беларусь, имеющее такую техническую возможность. В качестве технического решения выступает оптико-эмиссионный спектрометр ARL iSpark 8860 с функцией SparkDat (определение чистоты металла и контроль включений).

Возможность использовать дорогостоящее оборудование есть не у всех. Так, на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» 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 [3], т. е. «эффективный» бор можно спрогнозировать на основе анализа термодинамического равновесия системы Fe – Al – Ti – B – N. На рис. 8, 9 показана зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора.

Как следует из разработанной математической модели определения эффективного бора, для получения «эффективного» бора 0,001 % (минимальное значение для повышения механических свойств) требуется (рис. 8, 9) введение алюминия не менее 0,030 % и титана не менее 0,015 % при содержании азота 0,008 %; введение алюминия не менее 0,040 % и титана не менее 0,021 % при содержании азота 0,010 %.

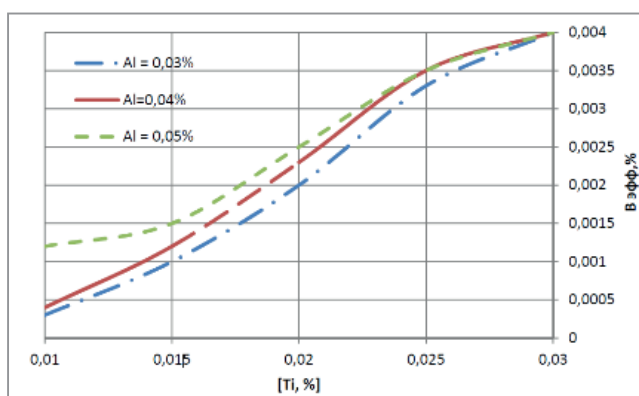


Рис. 8. Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0,008\%$ ;  $[B]_0 = 0,004\%$

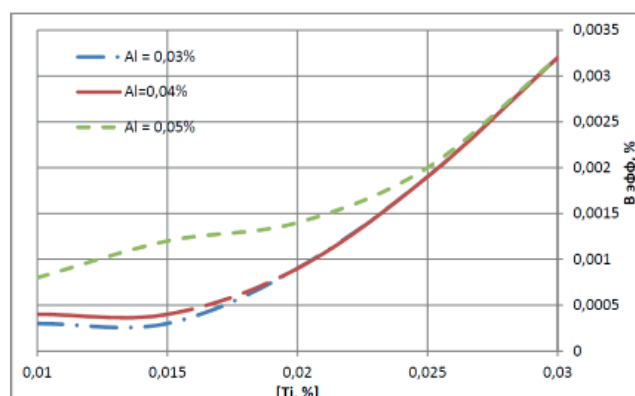


Рис. 9. Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0,010\%$ ;  $[B]_0 = 0,004\%$

По результатам исследования были сделаны выводы о получении несоответствий механических свойств в борсодержащих сталях:

- низкие значения механических свойств на шпильках находятся в зоне сужения на гладкой части стержня;
- результаты низких значений коррелируют со структурой, имеющей долю мартенсита менее 90 % в зоне сужения на гладкой части стержня;

- выявление бора в связанном состоянии в виде включений свидетельствует о его малоэффективности в стали.

С целью получения стабильных физико-механических параметров необходимо:

- обеспечивать содержание массовой доли следующих химических элементов в стали: алюминия – 0,035–0,045%, азота – не более 0,0080%;
- при выплавке борсодержащей стали обеспечить введение титана в 4–5 раз больше, чем содержание азота.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Филиппов А. А.** Повышение качества поверхности стального проката под калибровку перед высадкой крепежных изделий // Заготовительное производство. 2007. № 3. С. 51.
2. **Пачурин В. Г., Филиппова А. А. и др.** Формирование структурно-механических свойств проката стали 38ХА для получения высокопрочного крепежа // Тр. НГТУ им Р. Е. Алексеева. 2012. № 3.
3. **Потапов А. И.** Исследование процессов микролегирования стали бором с целью совершенствования технологии производства борсодержащей стали: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 116 с.
4. **Лякишев Н. П.** Борсодержащие стали и сплавы. М.: Metallurgija, 1986. 192 с.
5. **Парусов В. В. и др.** Новое применение бора в металлургии // Вест. МГТУ. 2005. № 1(9). С. 15–17.
6. **Парусов В. В. и др.** Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2010. 160 с.

#### REFERENCES

1. **Filippov A. A.** Povyshenie kachestva poverhnosti stal'nogo prokata pod kalibrovku pered vysadkoj krepzhnyh izdelij [Improving the surface quality of rolled steel for calibration before upsetting fasteners]. *Zagotovitel'noe proizvodstvo = Blank production*, 2007, no. 3, p. 51.
2. **Pachurin V. G., Filippova A. A. et al.** Formirovanie strukturno-mehaničeskikh svojstv prokata stali 38HA dlja poluchenija vysokoprochnogo krepzha [Formation of structural and mechanical properties of rolled steel 38XA for obtaining highstrength fasteners] *Trudy NGTU im R. E. Alekseeva=Proceedings of NGTU named after R. E. Alekseeva*, 2012, no. 3.
3. **Potapov A. I.** *Issledovanie processov mikrolegirovanija stali borom s cel'ju sovershenstvovanija tehnologii proizvodstva borsoderzhashhej stali* [Research of microalloying processes of steel with boron in order to improve the technology of production of boron steel]. *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehničeskikh nauk* [Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moscow, 2013, 116 p.
4. **Ljakishev N. P.** *Borsoderzhashhie stali i splavy* [Boron steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1986, 192 p.
5. **Parusov V. V. et al.** Novee primenenie bora v metallurgii [Boron new applications in metallurgy]. *Vestnik MGTU=Proceedings of MGTU*, 2005, no. 1(9), pp. 15–17.
6. **Parusov V. V. et al.** *Prokat iz borsoderzhashhih stalej dlja vysokoprochnykh krepzhnyh izdelij* [Boron steel products for high-strength fasteners]. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2010, 160 p.