



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-25-30>
УДК 621.771.25/.26:669.1

Поступила 08.01.2020
Received 08.01.2020

СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ КРЕПЕЖА

Г. П. ГОРЕЦКИЙ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,
ул. Купревича, 10,

Н. Ф. СОЛОВЕЙ, ОАО «Гомсельмаш» – управляющая компания холдинга ОАО «Гомсельмаш»,
г. Гомель, Беларусь,

С. Л. ШЕНЕЦ, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,
ул. Купревича, 10,

А. В. ТЕРЕЩЕНКО, С. В. АВДЕЕВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин,
Беларусь, ул. Промышленная, 37,

А. И. ПОКРОВСКИЙ, О. А. ТОЛКАЧЕВА, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: arturu@tut.by

В Беларуси производство горячекатаного проката сталей 20Г2Р, 30Г1Р, 20МпВ4, 30МпВ4 и 32CrВ4, микролегированных бором, осуществляет ОАО «БМЗ» по ТУ 14-1-4486-88 и ТУ 14-1-5490-2004 и в соответствии с международными стандартами DIN EN 10263-4. Они применяются для изготовления крепежа взамен ранее используемых сталей 35Х, 38Х и 40Х. В данной работе доказывается, что использование борсодержащих сталей позволяет снизить дефектности поверхности метизов; повысить стабильность механических свойств болтов, винтов, шпилек класса прочности 8.8 и 10.9 ГОСТ 1759.4-87; достичь высокого уровня ударной вязкости при отрицательных температурах. Показано, что сталь 20Г2Р обеспечивает стабильные механические свойства изделий размером до М27 (в отличие от стали марки 35Х, которая обеспечивает лишь для болтов М16 класса прочности 8.8). Показано, что борсодержащие стали в состоянии поставки со структурой зернистого перлита обладают высокой технологической пластичностью, в частности, формовка головки болта и накатка резьбы может проводиться в холодном состоянии без образования надрывов, как это происходит с хромистыми сталями типа 40Х. Установлено, что пластичность данных сталей повышается за счет пониженного содержания углерода и хрома, а также образования дисперсных карбонитридоборидных фаз глобулярной формы.

Ключевые слова. Борсодержащие стали, хромистые стали, горячекатаный прокат, крепеж, прокаливаемость, свойства, структура.

Для цитирования. Горецкий, Г. П. Структура и характеристики борсодержащих сталей для крепежа / Г. П. Горецкий, Н. Ф. Соловей, С. Л. Шенец, А. В. Терещенко, С. В. Авдеев, А. И. Покровский, О. А. Толкачева // Литие и металлургия. 2020. № 1. С. 25–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-25-30>.

STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF BORON-CONTAINING STEELS FOR FASTENERS

H. P. HARETSKI, State Scientific Institution «Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str.,

N. F. SOLOVEY, OJSC «Gomselmash» – Management Company of the Holding «Gomselmash», Gomel, Belarus,
S. L. SHENETS, State Scientific Institution «Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str.,

A. V. TERESCHENKO, S. V. AVDEEV, OJSC «BSW – Management Company of the Holding «BMC»,
Zhlobin, Belarus 37, Promyshlennaya str.,

A. I. POKROVSKII, O. A. TOLKACHOVA, State Scientific Institution «Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus», Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: arturu@tut.by

According to TU 14-1-4486-88 and TU 14-1-5490-2004, in accordance with international standards DIN EN 10263-4, OJSC «BSW – Management Company of the Holding «BMC» produces hot-rolled products of the following grades of steel: 20Г2Р,

30Г1Р, 20MnB4, 30MnB4 and 32CrB4 microalloyed with boron. They are used for the manufacture of fasteners instead of previously used steels 35X, 38X and 40X. The use of boron-containing steels reduces the surface defects of hardware; to increase the stability of the mechanical properties of bolts, screws, studs, strength class 8.8 and 10.9 by GOST 1759.4-87; to achieve a high level of toughness at negative temperatures. It is shown that steel 20Г2Р provides stable mechanical properties of products up to M27 (in contrast to steel grades 35X, which are designed exclusively for bolts of class M16 8.8). The boron-containing steels in the delivery state with the structure of granular perlite have high technological plasticity – in the cold, the bolt head is formed and the thread is rolled without tearing in the thread hollows, as is the case with chromium steels of type 40X. It was found that their ductility increases due to the low content of carbon and chromium, as well as the formation of dispersed carbonitride-boride phases of a globular form.

Keywords. Boron-containing steels, chromium steels, fasteners, hot rolled products, hardenability, properties, structure.

For citation. Haretski H. P., Solovey N. F., Shenets S. L., Tereshchenko A. V., Avdeev S. V., Pokrovskii A. I., Tolkacheva O. I. Structure and characteristics of boron-containing steels for fasteners. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 1, pp. 25–30. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-25-30>.

Важнейшей задачей современного машиностроительного крепежа является улучшение качества металлопродукции и изготавливаемых из нее деталей, повышение надежности и долговечности узлов.

ОАО «БМЗ» осуществляет производство горячекатаного сортового круглого проката различных профилеразмеров из сталей марок 20Г2Р, 30Г1Р, 20MnB4, 30MnB4 и 32CrB4, микролегированных бором. Данная продукция производится в соответствии с отечественными (ТУ 14-1-4486-88, ТУ 14-1-5490-2004), и международными стандартами (DIN EN10263-4) либо в соответствии с оригинальными фирменными спецификациями конечных потребителей. Основные потребители данной продукции – крупнейшие производители крепежных изделий как в РФ, так и в странах ЕС.

Вышеуказанные марки стали применяются для изготовления крепежа взамен сталей 35X, 38ХА и 40X, содержат бор и марганец, имеют высокие прочностные свойства, но из-за консерватизма белорусских машиностроителей практически в республике не используются и реализуются только за рубеж (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Химический состав сталей по ТУ 14-1-4486-88, ТУ 14-1-5490-2004, DIN EN10263-4

Химический элемент	Массовая доля элементов, %		
	20Г2Р (ТУ 14-1-4486-88)	30Г1Р (ТУ 14-1-5490-2004)	30MnB4 (DIN EN10263-4)
Углерод	0,17–0,24	0,27–0,33	0,27–0,32
Марганец	0,90–1,30	0,90–1,30	0,80–1,10
Алюминий	Не менее 0,010*	0,020–0,050	
Бор	Не менее 0,001	0,002–0,005	0,0008–0,005
Хром	Не более 0,250	0,15–0,30	Не менее 0,300
Кремний	0,17–0,350	Не более 0,170	Не менее 0,300
Сера	Не менее 0,035	Не более 0,015	Не более 0,025
Фосфор	Не менее 0,035	Не более 0,020	Не более 0,025
Азот	Не менее 0,012	Не более 0,010	–
Никель	–	Не более 0,100	–
Медь	–	Не более 0,100	Не более 0,25

* В сталь для раскисления вводят алюминий из расчета 0,01–0,05%, при этом его остаточная массовая доля должна быть не менее 0,01%.

Наша задача показать, что борсодержащие стали обладают более высокими эксплуатационными свойствами, чем хромистые стали, и дешевле их.

В рекламных публикациях России отмечается, что использование борсодержащих сталей 20Г2Р и 30Г1Р ТУ-14-1-5480-2004 имеет преимущества перед сталью марок 35X, 38ХА и 40X:

- снижение дефектности поверхности метизов;
- повышение стабильности механических свойств болтов, винтов, шпилек класса прочности 8.8 и 10.9 ГОСТ1759.4-87;
- сталь 20Г2Р обеспечивает стабильные механические свойства изделий до М27 (в отличие от стали марки 35X, которая обеспечивает лишь для болтов М16 класса прочности 8.8);
- высокий уровень ударной вязкости при отрицательных температурах.

Для автомобильной промышленности характерно преимущественное использование борсодержащих сталей для изготовления болтов, винтов, шпилек класса прочности 8.8 и 10.9 – сталь 20Г2Р и класса прочности 10.9 и 12.9 – сталь 30Г1Р.

Использование борсодержащих марок стали стало популярно во многих странах мира. Механические свойства болтов, изготовленных из борсодержащих сталей согласно ГОСТ ISO 898-1-2004, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Механические свойства болтов из борсодержащих сталей

Класс прочности	HV		σ_b , МПа не менее		$\sigma_{10,2}$, МПа не менее		A, % не менее	K_{Ic} , Дж, не менее $d \geq 16 \text{ мм}^2$ -20 °С
	$d \leq 16 \text{ мм}^2$	$d \geq 16 \text{ мм}^2$	$d \leq 16 \text{ мм}^2$	$d \geq 16 \text{ мм}^2$	$d \leq 16 \text{ мм}^2$	$d \geq 16 \text{ мм}^2$		
8,8	245–316	250–331	номинальная 800		номинальная 640		12	27
			800	830	640	660		
10,9	316–375		номинальная 1000		номинальная 900		9	27
			1040		940			

Промышленное использование борсодержащих сталей типа 20Г2Р, 30Г1Р и 30MnB4 при изготовлении ответственных крепежных деталей для автомобилей приводит к значительному увеличению прочности и стойкости последних. Особенностью этих сталей является сочетание высокой технологической пластичности и прокаливаемости. По сравнению с традиционными хромистыми сталями (35Х, 38ХА, 40Х) борсодержащие стали обладают меньшим сопротивлением деформированию при холодной штамповке, что обеспечивает хорошую штампуемость и повышение стойкости холодновысадочного инструмента.

Стали 20Г2Р, 30Г1Р и 30MnB4 характеризуются хорошей прокаливаемостью при охлаждении в воде и масле, а крепежные изделия из них после термической обработки обладают прочностными свойствами на уровне хромистых сталей при более высоких показателях пластичности и особенно вязкости. Испытания крепежных изделий из стали 30MnB4, изготовленных на холодноштамповочных автоматах с последующей термической обработкой, показали, что по механическим свойствам они соответствуют классу прочности 10.9 по ГОСТ ISO 898-1-2004. В условиях эксплуатации случаи разрушения крепежных изделий из этой стали практически не наблюдаются.

Использование борсодержащих сталей имеет массу преимуществ. Наиболее эффективно влияние бора оказывает на прокаливаемость. Введение одного атома бора на 25 000 атомов железа увеличивает глубину закаленного слоя в 2 раза [1], поэтому бор вводят в углеродистые стали для повышения механических свойств за счет повышения прокаливаемости, а в конструкционные легированные – для обеспечения того же эффекта при одновременном снижении расхода легирующих металлов без ухудшения механических свойств и с повышением показателей обрабатываемости, усталостной прочности, свариваемости. Это не только позволяет снизить себестоимость, но и улучшить его технологичность.

В работе [2] приведены данные, что присадка 0,001% В по влиянию на прокаливаемость эквивалентна введению 1,33%Ni + 0,31%Cr + 0,04%Mo, т. е. 1,68% дорогостоящих легирующих элементов.

Оптимальное количество бора, вызывающее наибольшее увеличение прокаливаемости, равно 0,0003–0,01%.

Приводятся также данные [2], что добавка 0,0015–0,0030% В может заменить значительное количество более дорогих легирующих элементов: Ni – 1,0–1,2%; Mo – 0,1–0,2; Cr – 0,3–0,4; Mn – 0,2–0,7; V – 0,12 и Si – 1,6%.

Цель введения бора – подавление образований феррита и обеспечение практически полностью мартенситной (бейнитной) структуры стали с более высокими механическими свойствами, на которые также благотворно влияют мелкодисперсные частицы карбоборидной фазы, образующиеся при термообработке.

Если учесть, что бор – поверхностно-активный элемент, то он, выделяясь по границам зерен, тормозит диффузию элементов стали, а также образующиеся карбонитробориды, подобно карбонитридам Nb, Ti и V, будут упрочнять сталь и повышать температуру рекристаллизации при проведении термической обработки.

Бор повышает длительную прочность, сопротивление ползучести и длительную пластичность сталей и сплавов. Основной причиной указанного влияния является растворение бора в граничных зонах, упрочняющее границы зерен и замедляющее протекание диффузионных процессов в этих участках [3, 4].

Наиболее сильный эффект повышения прокаливаемости за счет бора выражен для низкоуглеродистых сталей. По мере увеличения концентрации углерода он снижается и на прокаливаемость эвтектоидных сталей не влияет.

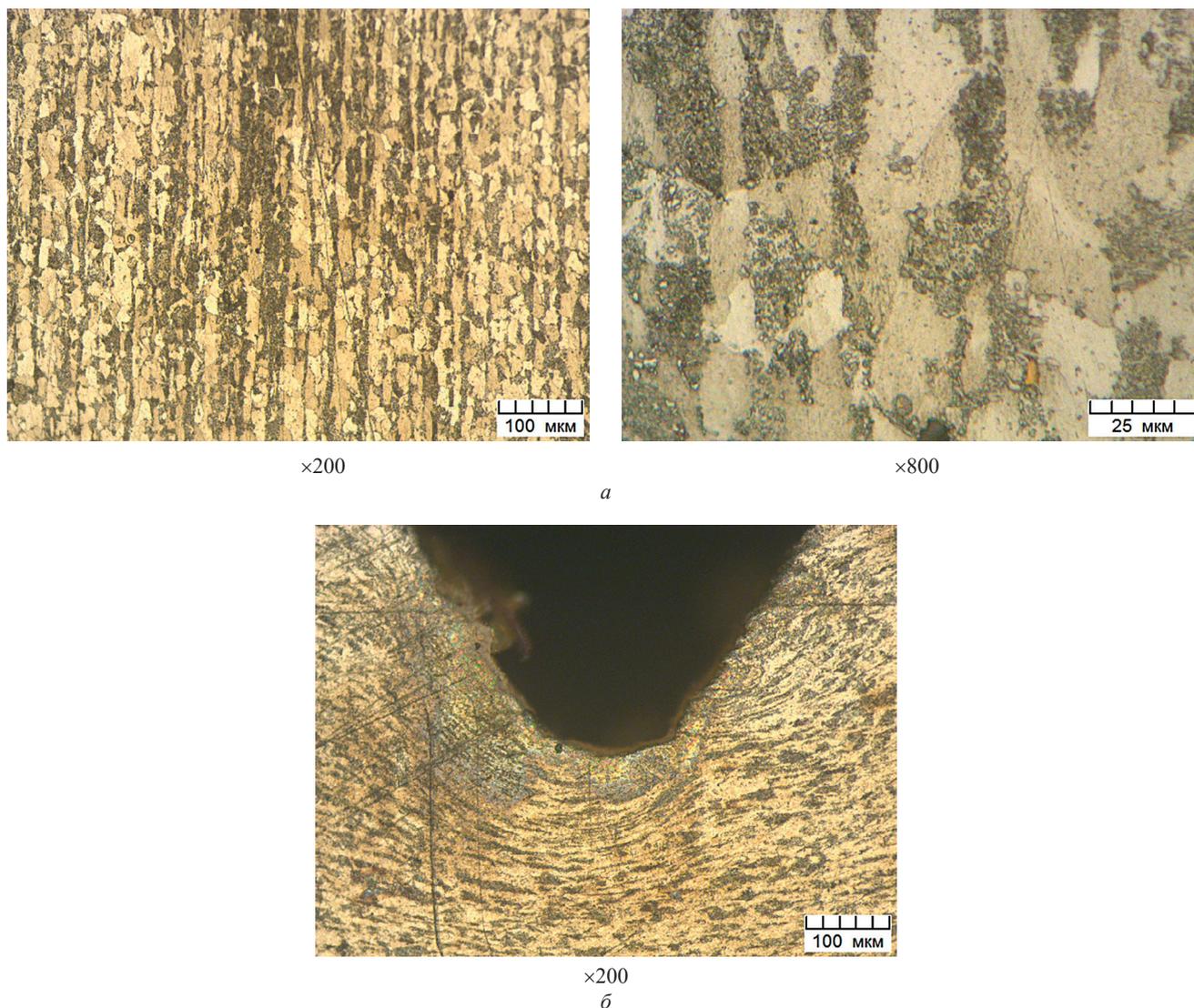


Рис. 1. Микроструктура стали 30MnB4: *a* – структура зернистого перлита вдоль направления прокатки; *б* – структура впадины резьбы болта

При повышении температуры аустенизации эффективность влияния бора также снижается.

Нами были проведены сравнительные испытания борсодержащей стали 30MnB4 и хромистой 40X. Исследованы структура сталей и свойства (твердость, микротвердость).

Сталь 30MnB4 в состоянии горячего проката после термообработки на зернистый перлит имеет феррито-перлитную структуру с колониями в виде цементитных зерен, вытянутых вдоль направления прокатки (рис 1, *a*). Прокат в таком состоянии имеет твердость 128–143 НВ.

После холодного формирования головки болта колонии зернистого перлита разворачиваются перпендикулярно направлению прокатки. Твердость головки болта в деформированном состоянии составляет 174–207 НВ.

Затем производится накатка резьбы и последующий отпуск при 580°C перед окончательной термообработкой (твердость 160 НВ). При накатке резьбы за счет высокой пластичности стали 30MnB4 поверхностные слои с колониями карбидов не перерезаются, а вдавливаются (рис 1, *б*), сохраняя высокую прочность.

Твердость болта в таком состоянии составляет 163–174 НВ.

После закалки (890 °С) структура болта мартенситная (рис. 2, *a*) с твердостью 46 HRC и после последующего отпуска (415 °С) он имеет структуру троостита отпуска с твердостью 36 HRC (рис 2, *б*).

Было исследовано состояние резьбы болтов, изготовленных из сталей марок 40X и 30MnB4. Накатку резьбы проводили после холодного формирования головки болта. Структура металла в обоих случаях – зернистый перлит.

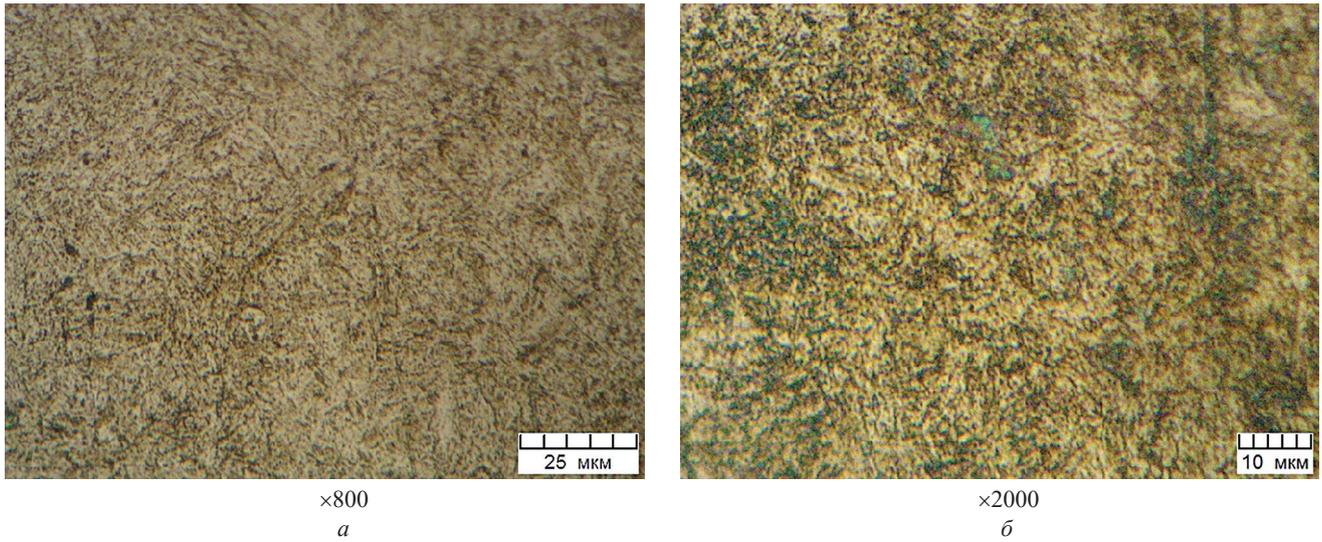


Рис. 2. Микроструктура стали 30MnB4: *a* – структура после закалки; *б* – структура после отпуска

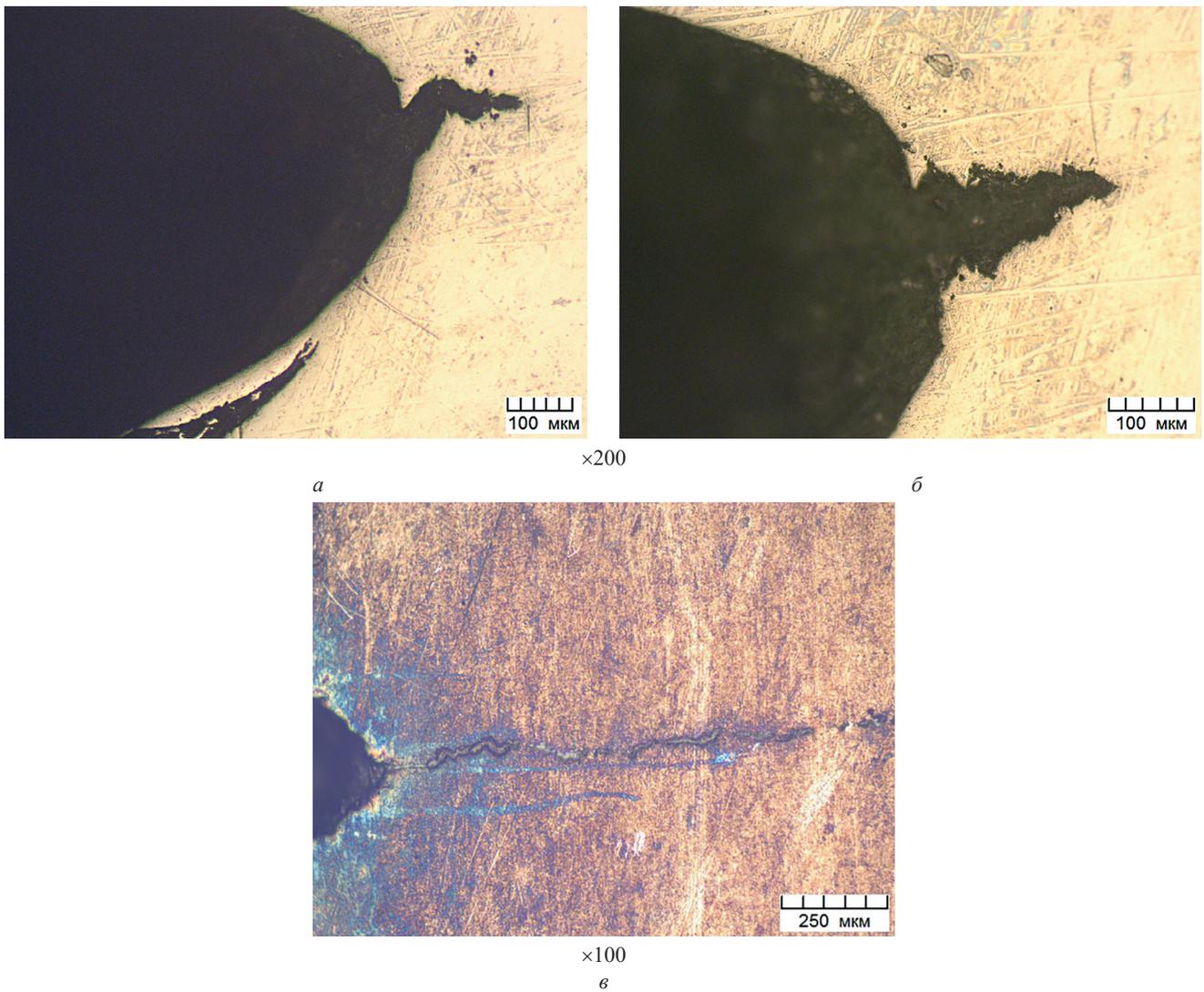


Рис. 3. Микроструктура впадин резьбы болтов из стали 40X: *a*, *б* – надрыв; *в* – трещина

На рис. 3, *a*, *б* показаны впадины резьбы болта, изготовленные из стали 40X. В некоторых местах после накатки резьбы во впадинах образуются остроконечные надрывы. Это концентраторы напряжений, которые могут привести к разрушению болта. На рис. 3, *в* показана трещина, образовавшаяся во время накатки. После термообработки (закалки) она окислилась.

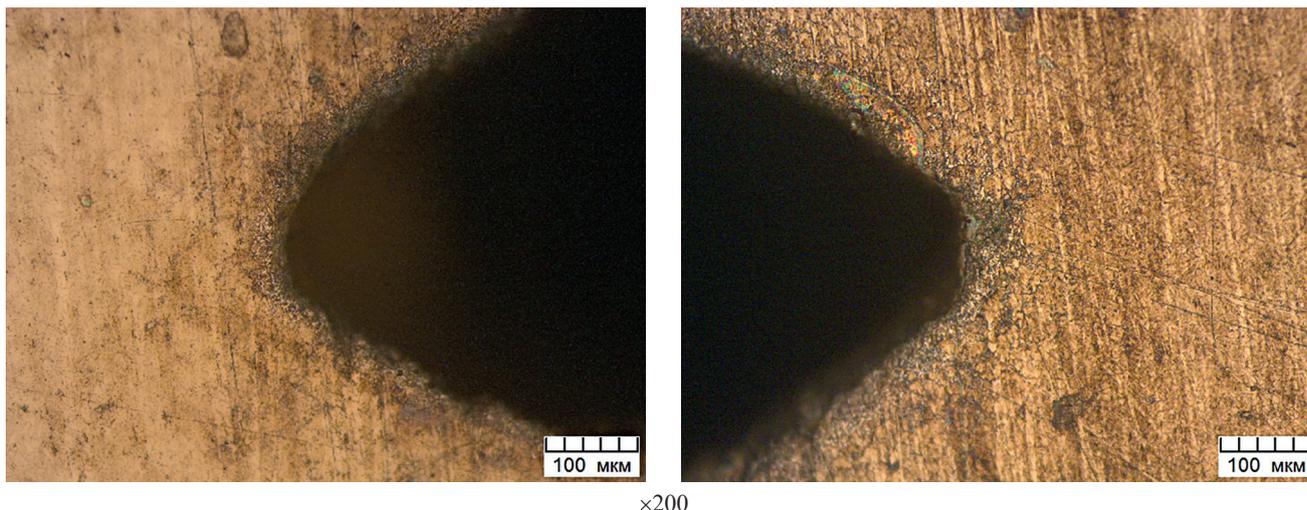


Рис. 4. Микроструктура впадин резьбы болтов из стали 30MnB4

На рис. 4 показаны впадины резьбы болта из стали 30MnB4. В них отсутствуют подобные надрывы. Была определена микротвердость обеих сталей в состоянии перед накаткой на микротвердомере ПМТ-3:

- сталь 40X – микротвердость зернистого перлита 209HV (210HB);
- сталь 30MnB4 – микротвердость зернистого перлита 140HV (140HB);
- сталь 30MnB4 – микротвердость феррита (127HV).

Как отмечалось ранее, сталь 30MnB4 имеет твердость ниже и обладает повышенной технологической пластичностью.

Выводы

Проведено исследование структуры (твердость и микротвердости) крепежных изделий из сталей 40X и 30MnB4.

Установлено, что за счет микролегирования бором (0,005%) низколегированных сталей происходит значительное повышение прокаливаемости (в 2–3 раза) и соответственно прочностных свойств. В связи с этим замена легированных сталей на борсодержащие дает высокую экономию легирующих элементов. Борсодержащие стали в состоянии поставки со структурой зернистого перлита обладают высокой технологической пластичностью – в холодную производится формовка головки болта и накатка резьбы без образования надрывов во впадинах резьбы, как происходит с хромистыми сталями типа 40X. Пластичность их повышается за счет пониженного содержания углерода и хрома, а также образования дисперсных карбонитридоборидных фаз глобулярной формы.

Эти боридные фазы, так же как и карбонитридные фазы карбидообразующих элементов Nb, Ti и V, повышают температуру рекристаллизации и упрочняют стали дисперсными выделениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Н. Н. Прокаливаемость стали. 2-е изд. М.: Металлургия, 1978. 192 с.
2. Ершов Т. С., Бычков Ю. Б. Физико-химические основы рационального легирования сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
3. Борисов В. Т., Голиков В. М., Любов В. Я. Изв. АН СССР ОТН. 1956. № 10. С. 37–47.
4. Борисов В. Т., Голиков В. М., Щербинский Г. В. Проблемы металловедения и физики металлов. М.: Metallurgizdat, 1962. Вып. 26. С. 501–521.

REFERENCES

1. Kachanov N. N. *Prokalivaemost stali* [Hardenability of steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978. 192 p.
2. Ershov T. S., Bychkov Ju. B. *Fiziko-himicheskie osnovy racionalnogo legirovanija stalej i splavov* [Physicochemical principles of rational alloying of steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1982. 360 p.
3. Borisov V. T., Golikov V. M., Ljubov V. Ja. *Izvestija AN SSSR OTN = Proceeding AN SSSR OTN*, 1956, no. 10, pp. 37–47.
4. Borisov V. T., Golikov V. M., Shherbinskij G. V. *Problemy metallovedenija i fiziki metallov* [Problems of metal science and metal physics]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, vyp. 26, pp. 501–521.