

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ СТРУКТУРЫ БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ МАРКИ СТАЛИ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОСЛЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА

С. А. САВЧЕНКО¹, ведущий инженер-технолог группы по сортовому прокату прокатного отдела технического управления, gtr.tu@bmz.gomel.by; И. А. КОВАЛЁВА¹, начальник исследовательской лаборатории исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного производств технического управления, ni.ict@bmz.gomel.by; И. А. ГУЗОВА¹, инженер-технолог 2-й категории исследовательской лаборатории исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного производств технического управления, gtr.ict@bmz.gomel.by; А. Б. СЫЧКОВ², д-р техн. наук, профессор кафедры литейного производства и материаловедения, absyckov@mail.ru
(¹ ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», Республика Беларусь, Гомельская обл., г. Жлобин;
² Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Россия, г. Магнитогорск)

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния исходной микроструктуры металла в поверхностном слое бунтового проката из подшипниковой марки стали ШХ15 при существующей технологии прокатки в низкотемпературном диапазоне на образование обезуглероженного слоя после сфероидизирующего отжига. Для обеспечения требований потребителя, предъявляемых к качеству металла, проведены исследования микроструктуры подповерхностной зоны бунтового проката. Приведено описание разработанного процесса охлаждения бунтового проката из подшипниковой марки стали на рольганге воздушного охлаждения катанки. Определено влияние температурно-скоростных режимов охлаждения бунтового проката на величину обезуглероженного слоя после проведения сфероидизирующего отжига. Исследована микроструктура образцов бунтового проката диаметром 16,5 мм, прокатанных по стандартному и экспериментальному режимам, а также после проведения сфероидизирующего отжига. Выявлены причины неполной сфероидизации бунтового проката в подповерхностном слое. Проведена оценка микроструктуры горячекатаных образцов, прокатанных по стандартным режимам, и установлено влияние дисперсности перлита в подповерхностном слое, которая приводит к завышенным показателям глубины обезуглероженного слоя после сфероидизирующего отжига. Определен эффективный режим охлаждения бунтового проката из подшипниковой марки стали для последующего сфероидизирующего отжига, обеспечивающий минимизацию обезуглероженного слоя и равномерность микроструктуры по всей длине бунта. Экспериментальный режим, заключающийся в смещении температуры начального охлаждения (в зоне виткообразователя) на 30 °С, в температурный диапазон 840–860 °С, при задействовании четырех вентиляторов с мощностью включения 30 % позволил получить равномерную структуру в поверхностной зоне (подповерхностной) как в горячекатаном (сорбитообразный, мелкопластинчатый перлит), так и в отожженном состоянии (сфероидизированный), а также определить направления дальнейшего совершенствования технологии.

Ключевые слова: обезуглероженный слой, дисперсность перлита, сфероидизирующий отжиг, технология прокатки, рольганг воздушного охлаждения катанки, температурно-скоростные режимы, грубопластинчатый характер выделения цементита.

Ссылка для цитирования: Савченко С. А., Ковалёва И. А., Гузова И. А., Сычков А. Б. Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 3. С. 251-260.

DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260

INFLUENCE OF INITIAL STRUCTURE OF ROLLED SECTIONS IN COILS OF BEARING STEEL GRADE ON UNIFORMITY OF OBTAINED STRUCTURE AFTER SPHEROIDIZING ANNEALING

S. A. SAVCHENKO¹, Leading Process Engineer of Rolled Section Steel Group of Rolling Department of Technical Board, gnp.tu@bmz.gomel.by; I. A. KOVALEVA¹, Head of Research Laboratory of Research Center – Branch Laboratory of Metallurgical and Steel-Wire Production Technologies of Technical Board, nl.icm@bmz.gomel.by; I. A. GUZOVA¹, Process-Engineer of 2nd Category of Research Center – Branch Laboratory of Metallurgical and Steel-Wire Production Technologies of Technical Board, gtp.icm@bmz.gomel.by; A. B. SYCHKOV², HD (Tech.), Professor of Foundry Production and Materials Science Department, absychkov@mail.ru
(¹ OJSC “BSW – management company of “BMC” holding”, Republic of Belarus, Gomel region, Zhlobin; ² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia, Magnitogorsk)

Abstract. The article presents the results of the study of the effect of the initial metal microstructure in the surface layer of bunched rolling at the existing technology of rolling in the low-temperature range from bearing steel grades ШХ15 on the formation of decarburized layer after spheroidizing annealing. To meet the customer's requirements for the metal quality, some studies of the microstructure of the subsurface zone of coiled steel have been carried out. There is a description of the developed process for cooling coiled steel made of bearing steel on an air-cooled roller table for wire rod. The effect of temperature-speed modes of coiled steel cooling on the size of the decarburized layer after spheroidizing annealing has been determined. The microstructure of coiled steel samples with a diameter of 16.5 mm, rolled according to the standard and experimental modes, as well as after spheroidizing annealing, has been studied. The causes of incomplete spheroidization of coiled steel in the subsurface layer have been revealed. The microstructure of hot-rolled samples rolled according to standard conditions has been evaluated and the effect of pearlite dispersion in the subsurface layer, which leads to overestimated values of the depth of the decarburized layer after spheroidizing annealing, has been established. An effective mode of cooling of coiled steel made of a bearing steel grade for subsequent spheroidizing annealing has been determined, which ensures the minimization of the decarburized layer and the uniformity of the microstructure along the entire coil length. The experimental mode, which consists in shifting the initial cooling temperature (in the laying coiler zone) by 30 °C, to the temperature range of 840–860 °C, with 4 fans involved and the switching-on power of 30%, allowed to obtain a uniform structure in the surface zone (subsurface), both in the hot-rolled state (sorbite-like, fine-lamellar perlite) and in the annealed state (spheroidized), as well as to determine directions of further improvement of the technology.

Keywords: decarburized layer, dispersion of perlite, spheroidizing annealing, rolling technology, air-cooled roller table for wire rod, temperature-speed modes, coarse-lamellar character of cementite extraction.

For citation: Savchenko S. A., Kovaleva I. A., Guzova I. A., Sychkov A. B. Influence of initial structure of rolled sections in coils of bearing steel grade on uniformity of obtained structure after spheroidizing annealing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2023, vol. 79, no. 3, pp. 251-260. (In Russ.).

DOI: 10.32339/0135-5910-2022-3-251-260

Сфероидизирующий отжиг подшипниковых сталей позволяет обеспечить необходимую степень растворения карбидной фазы при аустенизации и получить структуру с глобулярной формой цементита. Зернистый перлит является благоприятной структурой для дальнейшей обработки резанием, обеспечивает хорошую штампуемость, а также при проведении закалки сдерживает рост зерна и снижает риск появления трещин [1, 2].

Обезуглероженный слой (ОБС) характеризуется уменьшением концентрации углерода, ограниченным в основном поверхностными слоями металла. По требованиям потребителей

глубину ОБС определяют металлографическим методом согласно ГОСТ 1763. Зона частичного ОБС для заэвтектоидной стали представлена зоной феррито-перлитной структуры, зоной пластинчатого перлита при основной структуре зернистого перлита или зоной зернистого перлита, обедненной карбидами (рис. 1). Согласно требованиям спецификации потребителя, глубина ОБС не должна превышать 0,10 мм.

При контрольных испытаниях бунтового проката диаметром 16,5 мм из стали марки ШХ15 получены завышенные показатели глубины ОБС на конечном этапе производства готовой продукции после сфероидизирующего отжига.

Скорость проведения сфероидизирующего отжига и качество структуры после него напрямую зависят от структуры исходного горячекатаного металла. В работах [3–7] описано влияние мелкопластинчатого перлита как наиболее благоприятной структуры для проведения сфероидизирующего отжига.

Необходимо выяснить, влияет ли существующая технология прокатки в низкотемпературном диапазоне на микроструктуру в подповерхностной зоне высокоуглеродистого бунтового проката из стали марки ШХ15.

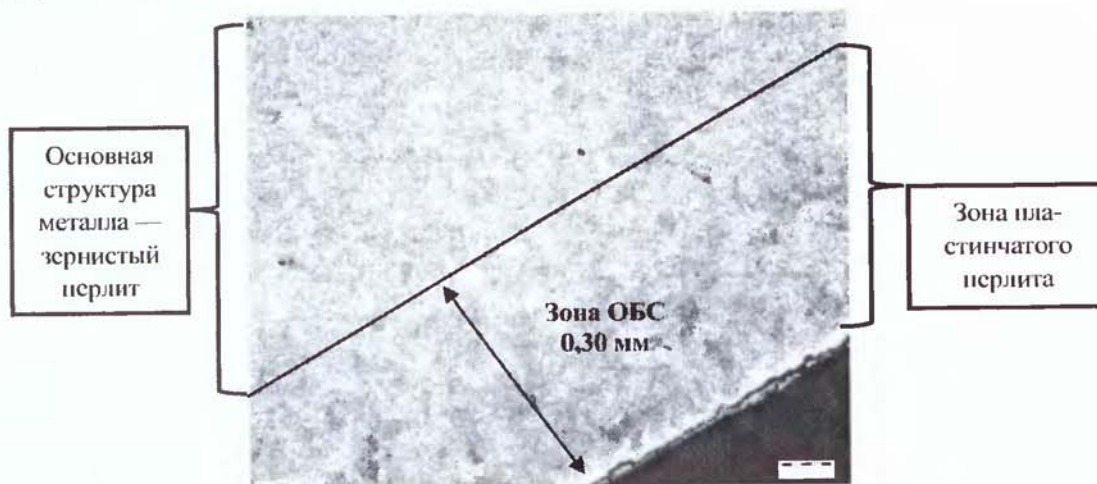


Рис. 1. Микроструктура бунтового проката диаметром 16,5 мм после сфероидизирующего отжига (стандартный режим охлаждения), $\times 100$

Fig. 1. Microstructure of rolled section steel in coils with diameter of 16.5 mm after spheroidizing annealing (standard cooling mode), $\times 100$

Главной задачей обеспечения равномерной микроструктуры бунтового проката для последующего отжига является подбор эффективных температурно-скоростных режимов охлаждения на линии «Стелмор». При несовершенстве технологии охлаждения высокоуглеродистого бунтового проката на линии «Стелмор» может проявиться неравномерность структуры (грубодисперсный перлит) как в центральных зонах бунтового проката, так и на поверхности [1–4].

Для обеспечения необходимых потребителям качественных характеристик бунтового проката в отоженном состоянии с регламентированными требованиями по глубине ОБС для стали марки ШХ15 был выполнен ряд исследований в прокатном производстве.

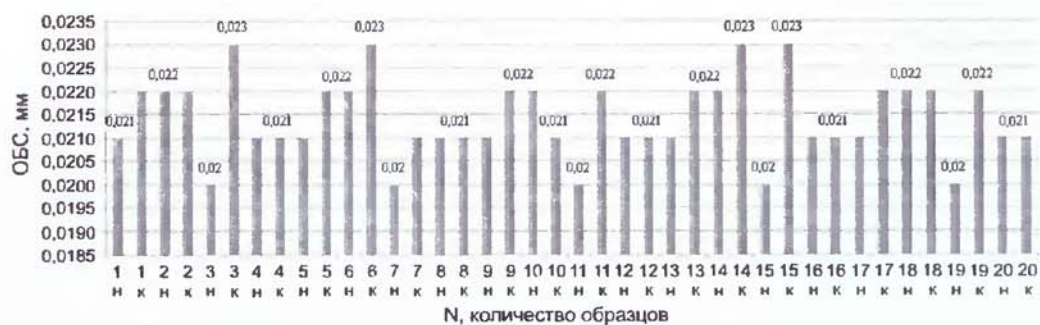
Целью работы являлось исследование влияния процесса охлаждения бунтового проката из подшипниковой марки стали в условиях линии катанки стана 370/150 для снижения глубины ОБС (минимизации участков пластинчатого перлита) после сфероидизирующего отжига. Качество непрерывнолитой заготовки и влияние прокатного передела на другие качественные характеристики рассмотрены в работах [8–10].

Разработка эффективного режима охлаждения осуществлялась в два этапа. На первом

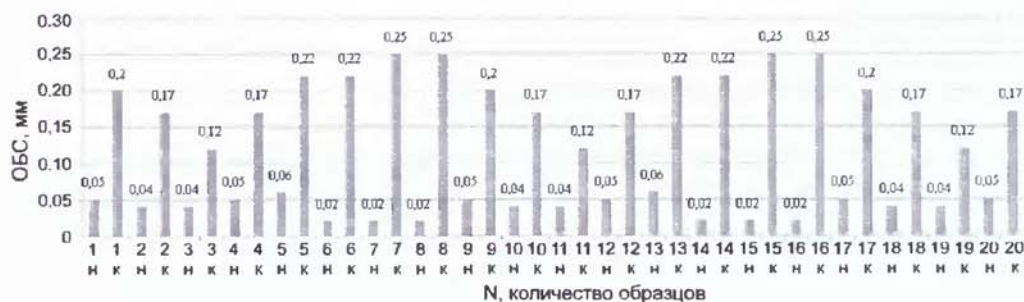
этапе провели исследования микроструктуры поверхности 40 образцов (20 бунтов) диаметром 16,5 мм, прокатанных по стандартной технологии. Вторым этапом эксперимента являлся отбор и исследование образцов после сфероидизирующего отжига (режимы отжига не корректировались) в печи с защитной атмосферой (азот). Пробы отбирали от начала и конца бунтового проката. Результаты исследований бунтового проката представлены на рис. 2.

На основе анализа данных рис. 2 можно сделать вывод о том, что уровень ОБС до термообработки удовлетворительный, находится в допуске согласно ГОСТ 801 и практически равномерен по всем исследуемым бунтам (рис. 3, а). Исследования образцов после сфероидизирующего отжига показали неудовлетворительные результаты по повышенному ОБС согласно требованиям потребителя (не более 0,10 мм), что указывает на неравномерность микроструктуры в подповерхностном слое.

Обзор технической литературы показывает, что кинетика превращения перлита в аустенит и растворимость различных форм карбидов широко изучены. При этом установлено весьма большое влияние исходной структуры на скорость превращения и ее конечный результат.



а



б

Рис. 2. Уровень обезуглероженного слоя бóутового проката диаметром 16,5 мм:
а — до термообработки; б — после термообработки в печи с защитной атмосферой

Fig. 2. Depth of decarburized layer of rolled section steel in coils with diameter of 16.5 mm:
а — before thermal treatment; б — after thermal treatment in the furnace with protecting atmosphere

Скорость растворения карбидов определяется величиной их поверхности, являющейся одновременно поверхностью соприкосновения с ферритом.

Твердый раствор быстрее всего образуется при исходной структуре мелкопластинчатого перлита (см. рис. 3, б). Чем дисперснее исход-

ная структура (см. рис. 3, в), тем на более высоком уровне концентрации аустенита заканчивается процесс [5].

Таким образом, размер межпластинчатого расстояния в зернах перлита зависит от охлаждения при горячей прокатке.

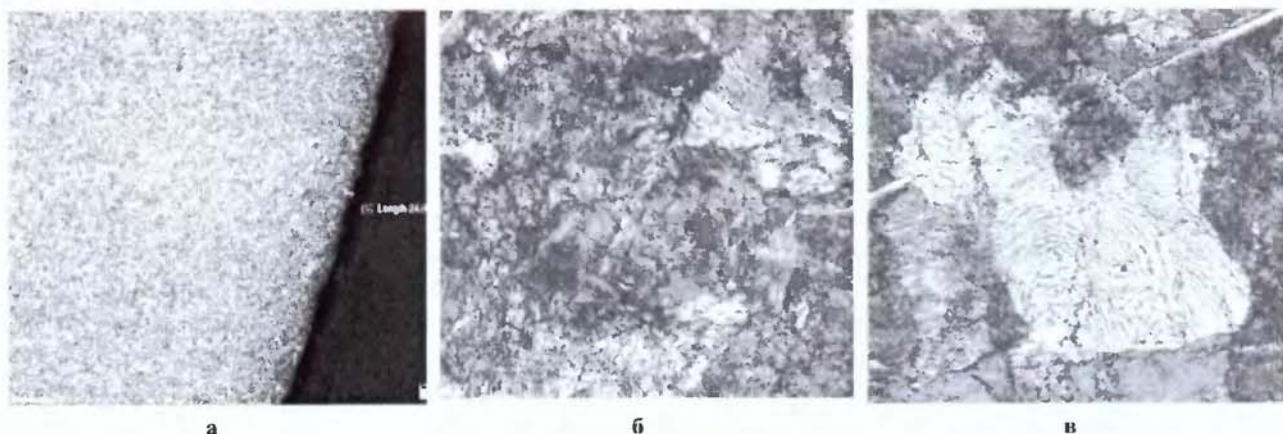


Рис. 3. Микроструктура подшипниковой стали (ШХ15):
а — после горячей прокатки, $\times 100$; б — сорбитообразная, мелкопластинчатая характеристика перлита, $\times 1000$;
в — грубопластинчатая характеристика перлита, $\times 1000$

Fig. 3. Microstructure of bearing steel (grade ШХ15):
а — after hot-rolling, $\times 100$; б — sorbitol-like, fine-lamellar characteristic of perlite, $\times 1000$;
в — coarse-plate characteristic of perlite, $\times 1000$

Оценку дисперсности перлита проводили согласно ГОСТ 8233, каждому из исследуемых образцов присваивали балл и отслеживали влияние режима охлаждения.

Существующий технологический режим охлаждения бунтового проката, включающий начальное охлаждение (в зоне виткообразователя) до температуры 870–910 °С, при задействовании четырех вентиляторов с мощностью включения 10 % не обеспечивал получения равномерной микроструктуры как по длине, так и по сечению проката. В ходе работы был прокатан бунтовой прокат диаметром 16,5 мм по стандартному режиму с последующим металлогра-

фическим исследованием образцов, отобранных от начала и конца бунта для определения дисперсности перлита в подповерхностном слое бунтового проката (рис. 4).

Согласно ГОСТ 8233, перлит на рис. 4 и 5 имеет грубопластинчатую форму в подповерхностном слое.

На рис. 6 и 7 приведены величина и микроструктура ОБС. После прокатки по стандартному режиму ОБС имеет небольшую глубину залегания.

Далее бунтовой прокат был подвергнут сфероидизирующему отжигу для получения зернистого перлита. Результаты металлографических исследований приведены на рис. 8 и 9.



Рис. 4. Дисперсность перлита в подповерхностном слое бунтового проката диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 8233 (стандартный режим охлаждения)

Fig. 4. Dispersion of perlite in the subsurface layer of rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 8233 (standard cooling mode)



Рис. 5. Дисперсность перлита в подповерхностном слое после прокатки (стандартный режим охлаждения), ×1000

Fig. 5. Dispersion of perlite in the subsurface layer after rolling (standard cooling mode), ×1000

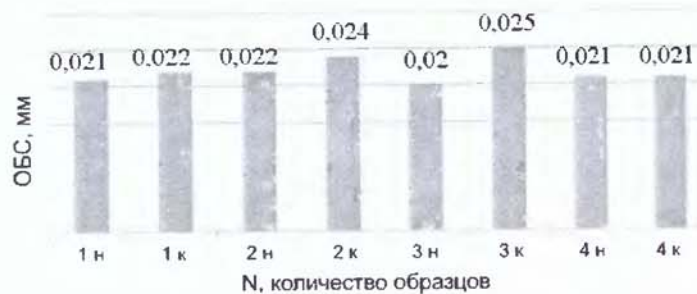


Рис. 6. Величина обезуглероженого слоя в бунтовом прокате диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 1763 (стандартный режим охлаждения)

Fig. 6. Depth of the decarburized layer on rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 1763 (standard cooling mode)



Рис. 7. Обезуглероживший слой горячекатаного образца буитового проката (стандартный режим охлаждения), $\times 100$

Fig. 7. The decarburized layer of hot-rolled sample of rolled sections in coils (standard cooling mode), $\times 100$

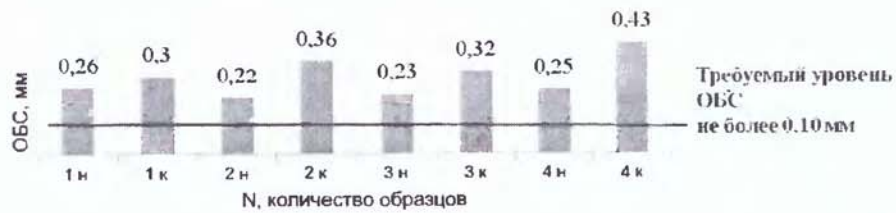
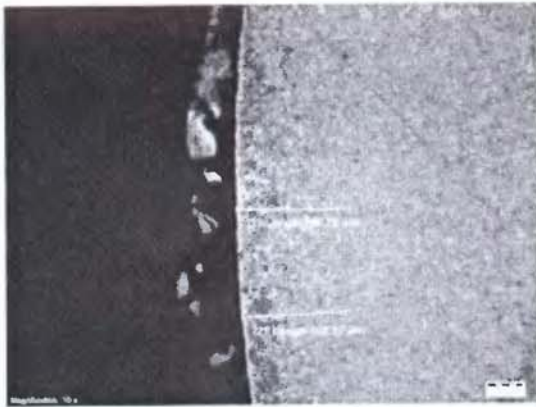
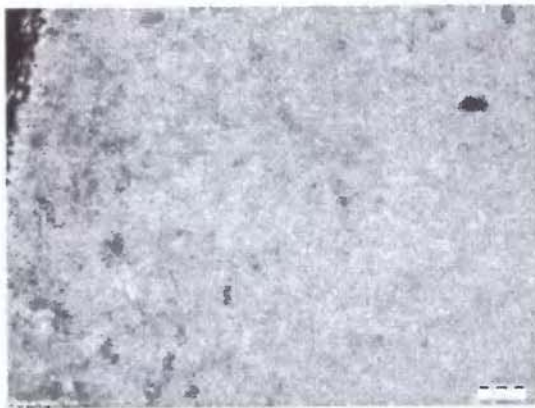


Рис. 8. Величина обезуглерожившего слоя буитового проката диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 1763 после сфероидизирующего отжига (стандартный режим охлаждения)

Fig. 8. Depth of decarburized layer on rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 1763 after spheroidizing annealing (standard cooling mode)



а



б

Рис. 9. Микроструктура буитового проката диаметром 16,5 мм в зоне обезуглерожившего слоя после сфероидизирующего отжига (стандартный режим охлаждения): а – увеличение, $\times 100$; б – увеличение, $\times 500$

Fig. 9. Microstructure of rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm in decarburized layer after spheroidizing annealing (standard cooling mode): а – magnification, $\times 100$; б – magnification, $\times 500$

Анализируя микроструктуру на рис. 8 и 9, можно отметить, что после отжига получена неравномерная структура в подповерхностном слое с остатками пластинок перлита. На рис. 9, а, приведены замеры ОБС с максимальной глубиной 0,30 мм. На рис. 9, б, показана микроструктура ОБС при увеличении $\times 500$, наличие участков с пластинчатым перлитом в подшипниковой стали считается зоной частичного ОБС согласно ГОСТ 1763.

Анализ показал, что грубопластинчатая характеристика перлита в подповерхностном слое приводит к неравномерной форме глобулярного перлита после отжига [5, 6]. Исследовательские

данные ОБС, полученные по стандартной технологии, указывают на недостаточную степень охлаждения на линии «Стелмор».

Был предложен новый экспериментальный режим, заключающийся в смещении температуры начального охлаждения (в зоне виткообразователя) на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, в температурный диапазон $840\text{--}860\text{ }^{\circ}\text{C}$, при задействовании четырех вентиляторов с мощностью включения 30 % для изменения формы и межпластинчатого расстояния перлита. По новым экспериментальным режимам был прокатан бунтовой прокат диаметром 16,5 мм. Отбор проб осуществляли аналогично стандартному режиму прокатки, результаты представлены на рис. 10 и 11.

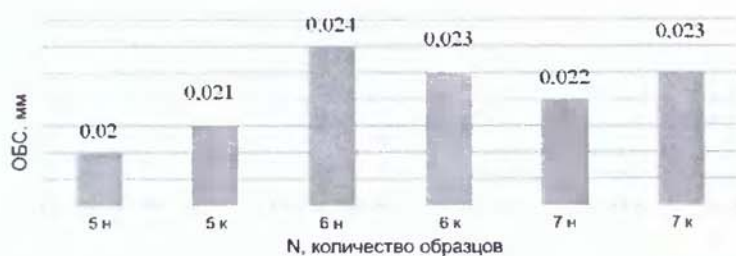


Рис. 10. Величина обезуглероживленного слоя бунтового проката диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 1763 (экспериментальный режим охлаждения)

Fig. 10. Depth of decarburized layer on rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 1763 (experimental cooling mode)



Рис. 11. Обезуглероживленный слой бунтового проката в горячекатаном состоянии (экспериментальный режим охлаждения), $\times 100$

Fig. 11. The decarburized layer on rolled section steel in coils in hot-rolled condition (experimental cooling mode), $\times 100$

Из рис. 10 и 11 видно, что величина ОБС бунтового проката в горячекатаном состоянии, полученного по экспериментальному режиму, находится на уровне стандартного режима.

Дисперсность перлита в подповерхностном слое горячекатаного бунтового проката значительно снизилась (рис. 12 и 13).

На основе анализа полученных данных можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. Величина ОБС горячекатаного бунтового проката, полученного по стандартному и экспериментальному режимам охлаждения, находится на одинаковом уровне.

2. Корректировка температуры и степени охлаждения бунтового проката на линии «Стелмор» позволила снизить балл дисперсности перлита,

получить мелкопластинчатую форму и равномерное распределение в подповерхностной зоне.

Далее для анализа влияния новой полученной структуры произвели сфероидизирующий отжиг (стандартный режим) бунтового проката, прокатанного по новому экспериментальному режиму. Результаты оценки ОБС приведены на рис. 14.

После отжига получили ОБС, не превышающий допуски согласно требованиям потребителя (не более 0,10 мм, см. рис. 14). На рис. 15, а, приведены замеры ОБС, на рис. 15, б, показана микроструктура ОБС при увеличении $\times 500$, участки микроструктуры темного цвета (пластинчатый перлит) уже отсутствуют — структура полностью сфероидизирована.



Рис. 12. Дисперсность перлита бунтового проката диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 8233 (экспериментальный режим охлаждения)

Fig. 12. Dispersion of perlite of rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 8233 (experimental cooling mode)



Рис. 13. Дисперсность перлита в подповерхностном слое бунтового проката (экспериментальный режим охлаждения), $\times 1000$

Fig. 13. Dispersion of perlite in subsurface layer of section rolled steel in coils (experimental cooling mode), $\times 1000$



Рис. 14. Величина обезуглероженого слоя в бунтовом прокате диаметром 16,5 мм согласно ГОСТ 1763 после сфероидизирующего отжига (экспериментальный режим охлаждения)

Fig. 14. Depth of decarburized layer on rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm according to GOST 1763 after spheroidizing annealing (experimental cooling mode)



а



б

Рис. 15. Микроструктура бунтового проката диаметром 16,5 мм в подповерхностной зоне обезуглероженого слоя после сфероидизирующего отжига (экспериментальный режим охлаждения): а – увеличение, $\times 100$; б – увеличение, $\times 500$

Fig. 15. Depth of decarburized layer on rolled section steel in coils with diameter 16.5 mm after spheroidizing annealing (experimental cooling mode): а – magnification, $\times 100$; б – magnification, $\times 500$

Выводы

1. Установлено, что исходная грубопластинчатая дисперсность перлита на поверхности бунтового проката после горячей прокатки по стандартным режимам (начальное охлаждение в зоне виткообразователя до температуры 870–910 °С, четыре задействованных вентилятора с мощностью включения 10 %) приводит к повышенным показателям глубины ОБС после сфероидизирующего отжига бунтов.

2. Экспериментальный режим охлаждения бунтового проката при температуре 860 °С, в действии четырех вентиляторов с мощностью включения 30 % и замедленном охлаждении под крышками на линии «Стелмор» позволил получить равномерную структуру в поверхностной зоне (подповерхностной) как в горячекатаном (сорбитообразный, мелкопластинчатый перлит), так и в отожженном состоянии (сфероидизированный).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спектор А. Г., Зельберт Б. М., Киселева С. А. Структура и свойства подшипниковых сталей. — М.: Металлургия, 1980. — 264 с.
2. Смирнов М. А., Счастливцев В. М., Журавлев Л. Г. Основы термической обработки стали: учебное пособие. — Екатеринбург: УрО РАН, 1999. — 494 с.
3. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. — М.: Металлургиздат, 1977. — 224 с.
4. Попова Л. Е., Попов А. А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: справочник термиста. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1991. — 500 с.
5. Раузин Я. Р. Термическая обработка хромистой стали (для подшипников и инструментов). 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1978. — 277 с.
6. Яценко Ю. В., Спектор Я. И. Влияние состояния аустенита на формирование карбидной сетки в высокоуглеродистых сталях // Сталь. 1984. № 10. С. 75, 76.
7. Яценко Ю. В., Емченко В. С., Реус В. А., Лихов В. К. Качество катанки подшипниковой стали после двухстадийного охлаждения // Сталь. 1985. № 6. С. 62, 63.
8. Путеев В. С., Савченко С. А., Панковец И. А., Возная В. И., Астапенко И. В. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 // Литье и металлургия. 2021. № 3. С. 65–73. DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.
9. Панковец И. А., Савченко С. А., Возная В. И., Версцагин М. Н., Астапенко И. В. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 7. С. 804–810. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
10. Савченко С. А., Возная В. И., Астапенко И. В. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого: научно-практический журнал. 2021. № 2. С. 52–61. EDN: JVZFKY.

Поступила 30 января 2023 г.

REFERENCES

1. Spektor A. G., Zel'bert B. M., Kiseleva S. A. *Struktura i svoistva podshipnikovykh staley* [Structure and properties of bearing steels]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p. (In Russ).
2. Smirnov M. A., Schastlivtsev V. M., Zhuravlev L. G. *Osnovy termicheskoi obrabotki stali* [Fundamentals of heat treatment of steel]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1999, 494 p. (In Russ).
3. Golikov I. N., Maslenkov S. B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic segregation in steels and alloys]. Moscow: Metallurgizdat, 1977, 224 p. (In Russ).
4. Popova L. E., Popov A. A. *Diagrammy prevrashcheniya austenita v stalyakh i beta-rastvora v splavakh titana: spravochnik termista* [Diagrams of transformation of austenite in steels and beta solution in titanium alloys: thermist's handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 500 p. (In Russ).

5. Rauzin Ya. R. *Termicheskaya obrabotka khromistoi stali (dlya podshipnikov i instrumentov)* [Heat treatment of chromium steel (for bearings and tools)]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 277 p. (In Russ).
6. Yatsenko Yu. V., Spektor Ya. I. Influence of austenite state on formation of carbide net in high-carbon steels. *Stal'*, 1984, no. 10, pp. 75–76. (In Russ).
7. Yatsenko Yu. V., Emchenko B. C., Reus B. A., Likhov V. K. Quality of bearing steel wire rod after two-stage cooling. *Stal'*, 1985, no. 6, pp. 62, 63. (In Russ).
8. Puteev V. S., Savchenko S. A., Pankovets I. A., Voznaya V. I., Astapenko I. V. Improvement of the technological process of manufacturing bearing grades of steel at the 370/150 mill. *Lit'e i metallurgiya*, 2021, no. 3, pp. 65–73. (In Russ). DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.
9. Pankovets I. A., Savchenko S. A., Voznaya V. I., Vereshchagin M. N., Astapenko I. V. Study of factors contributing to reduction of carbide inhomogeneity in bearing steel grades. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 7, pp. 804–810. (In Russ). DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
10. Savchenko S. A., Voznaya V. I., Astapenko I. V. Assessment of efficiency of homogenizing annealing modes of bearing steel grades at OJSC “BSW – management company of “BMC” holding”. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo: nauchno-prakticheskii zhurnal*. 2021, no. 2, pp. 52–61. (In Russ). EDN: JVZFKY.

Received January 30, 2023