ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online) УДК 621.771:621.785.3 DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Савченко С.А.¹, Ковалёва И.А.¹, Астапенко И.В.², Сычков А.Б.³

¹Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

³Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Для получения структуры зернистого перлита применяется сфероидизирующий отжиг стали. Сфероидизация цементитных пластин протекает в два этапа: деление карбидных составляющих на части и собственно сфероидизация. Трансформация пластинчатого перлита происходит при длительных временных выдержках (от 2-4 ч и более) при температурах сфероидизации (A₁ ≈ 727°C). Это вызвано, в первую очередь, двухэтапным протеканием процесса. Процесс сфероидизации влияет не только на форму, но и на размер карбидов. Для получения необходимого размера глобулей цементита контролируется скорость нагрева и охлаждения, а для окончания процесса трансформации – время выдержек при определенных изотермических температурах. В статье представлены результаты исследования влияния длительности временных выдержек при циклическом (маятниковом) сфероидизирующем отжиге бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15 на степень полноты трансформации пластинчатого перлита в зернистый. Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм, прокатанной по усовершенствованному режиму, позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126-0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,08 мкм. Цель работы заключалась в определении влияния времени изотермических выдержек при циклическом сфероидизирующем отжиге на полноту и качество трансформации пластинчатого в зернистый перлит. При этом использовались четыре экспериментальных режима со временем изотермических циклических выдержек на 10, 25, 50 и 75% (соответственно режимы № 1-4) меньше действующего режима. Установлено, что режимы № 1-3 позволяют получить 100%-ю сфероидизацию пластинчатого перлита катанки. В режиме № 4 эффект формирования структуры 100% зернистого перлита не достигнут, однако дробления пластин цементита не выявлено, что свидетельствует об одноэтапном процессе сфероидизации.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, сфероидизирующий отжиг, исходная структура, пластинчатый перлит, маятниковый (циклический) отжиг, время циклических изотермических выдержек, обезуглероженный слой, цементитные пластины и глобули

© Савченко С.А., Ковалёва И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б., 2025

Для цитирования

Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / Савченко С.А., Ковалёва И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 62-72. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License. The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ENHANCING SPHEROIDIZING ANNEALING TECHNOLOGY OF ROLLED PRODUCTS IN COILS FROM BEARING STEEL

Savchenko S.A.¹, Kovaliova I.A.¹, Astapenko I.V.², Sychkov A.B.³

¹Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus
 ²Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus
 ³Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia

Abstract. To obtain the structure of granular pearlite, spheroidizing annealing of steel is used. Spheroidization of cementite plates occurs in two stages: division of carbide components into parts and spheroidization itself. Transformation of lamellar perlite occurs during long-term exposure (from 2-4 hours and more) at spheroidization temperatures $(A_1 \approx 727^{\circ}C)$. First of all, this is caused by the two-stage process. The spheroidization process affects not only the shape, but also the size of the carbides. To obtain the required size of cementite globules, the heating and cooling rate is controlled, and to complete the transformation process, the exposure time at certain isothermal temperatures is controlled. The article presents the study results of the influence of the holding time duration during cyclic (pendulum) spheroidizing annealing of rolled products in coils made of ShH15 bearing steel on the degree of transformation completeness of lamellar pearlite into granular one. The studies were carried out on wire rod with a diameter of 6.5 mm, rolled according to an improved mode, which makes it possible to obtain an initial fine pearlite structure with an interplate distance of 0.126-0.235 µm and a cementite plate size of no more than 0.08 µm. The purpose of the work was to determine the effect of isothermal holding time during cyclic spheroidizing annealing on the completeness and quality of carbide plates into granular pearlite transformation. In this case, four experimental modes were used with isothermal cyclic exposure times 10, 25, 50 and 75% (modes No. 1-4, respectively) less than the current mode. It has been established that modes No. 1-3 make it possible to obtain 100% spheroidization of wire rod lamellar pearlite. In mode No. 4, the effect of forming a structure of 100% granular pearlite was not achieved, however, crushing of cementite plates was not detected, which indicates a one-stage spheroidization process.

Keywords: bearing steel, spheroidizing annealing, initial structure, lamellar pearlite, pendulum (cyclic) annealing, time of cyclic isothermal exposures, decarburized layer, cementite plates and globules

For citation

Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Enhancing Spheroidizing Annealing Technology of Rolled Products in Coils from Bearing Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 62-72. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-62-72

Введение

Подшипниковые марки стали для обработки давлением и резанием должны иметь в исходном состоянии структуру зернистого перлита определенного балла, то есть перлита с глобулярной морфологией карбидной фазы определенного размера. Обусловлено это тем, что такая структура применительно к этим сталям, по сравнению со структурой пластинчатого перлита, обладает рядом достоинств [1]. Это связано с напряженно-деформационным состоянием при производстве составляющих деталей подшипника, а именно схемой всестороннего сжатия, для которой наиболее эффективной структурой является зернистый перлит против пластинчатого перлита.

Для получения структуры с частично или полностью сфероидизированной карбидной фазой, обладающей наилучшей технологичностью и экономичностью при последующих переделах, прокат из подшипниковых сталей подвергают специальной термической обработке – сфероидизирующему отжигу по различным режимам, зависящим от вида и назначения отжигаемой металлопродукции, имеющегося для этого оборудования, предпочтений технологов-термистов.

Наиболее распространенными режимами сфероидизирующего отжига являются: одноступенчатый (**рис. 1, a**); с одной фазовой перекристаллизацией, двухступенчатый (**рис. 1, б**); с двумя фазовыми перекристаллизациями и выдержками при разных надкритических температурах, многоступенчатые циклические (**рис. 1, в**), то есть с несколькими фазовыми перекристаллизациями или без выдержек, или с выдержками различной продолжительности при над- и подкритических температурах, или комбинированно.

Общим недостатком первых двух режимов является большая их длительность, обычно намного больше времени других этапов прокатного производства. Недостатком третьего режима является невозможность применения его для металлопродукции больших сечений.





Fig. 1. Options of spheroidizing annealing modes: a is one-step annealing with non-stop cooling; δ is isothermal two-step annealing; в is cyclic annealing of pendulum type

Механизм образования карбидной фазы глобулярной морфологии в стальной металлопродукции осуществляется путем создания условий для абнормального, неэвтектоидного распада аустенита на нормальную структуру зернистого перлита. Этот способ образования структуры зернистого перлита требует меньше времени и поэтому получил широкое распространение в промышленности, является в настоящее время доминирующим в мировой практике. Однако превращение аустенита при охлаждении непосредственно в зернистый перлит, то есть минуя нормальное эвтектоидное превращение, возможно лишь при выполнении определенных условий: наличии в 1 см³ аустенита около 5·10⁹ карбидных глобулярных частиц диаметром до 0,3 мкм; охлаждение со скоростью до 30-50 °С/ч от надкритической до подкритической температуры [1, 2]. При выполнении этих условий превращение аустенита протекает по абнормальному механизму: благодаря малым путям диффузии и скорости охлаждения углерод из аустенита выделяется в виде цементита на имеющихся карбидных глобулах, а обедненный углеродом до точки «Р» диаграммы состояния Fe-C аустенит превращается в феррит. Образуется нормальная структура зернистого перлита с почти одноразмерными, равномерно распределенными карбидными глобулами. При этом число карбидных частиц практически не изменяется [3], увеличивается лишь их размер.

При невыполнении первого условия, то есть при меньшем «карбидном числе», даже при последующем медленном охлаждении значительная часть аустенита претерпевает эвтектоидное превращение по нормальному механизму в перлит пластинчатый, то есть перлит с пластинчатой морфологией составляющих его фаз феррита и цементита. При невыполнении второго условия, даже при наличии в аустените необходимого числа карбидов, значительная часть аустенита также превращается по нормальному механизму, благодаря кинетическому фактору, в перлит пластинчатый. У подшипниковых сталей получение необходимого карбидного числа затруднений не вызывает, так как у них выше точки A_{C1} на диаграмме состояния имеется широкая область температур устойчивого существования карбидной фазы. Поэтому и «интервал отжигаемости» на зернистый перлит у них довольно широкий, что позволяет производить сфероидизирующий отжиг в промышленных условиях без особых затруднений в печах и непрерывного, и периодического действия. Однако и в этом случае из-за ограниченной скорости охлаждения общая длительность отжига получается большой, намного превосходит длительность взаимосвязанных с отжигом технологических процессов производства металлопродукции [4, 5].

Для проведения сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковых сталей в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга "БМК"» применяется универсальный режим циклического отжига маятникового типа с двумя циклами нагрев/охлаждение (**рис. 2**).

Эффективные температуры нагрева для отжига 780°С и охлаждение в области подкритических температур 620-650°С утвержденного режима представлены в табл. 1.

Конец превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ при температуре 760°С для стали ШХ15 является нижним пределом, а температура относительного выравнивания концентрации аустенита 840-845°С - соответственно верхним пределом тех температур нагрева, при которых возможно образование зернистого перлита при отжиге. В этом интервале температур эффективной нужно считать температуру 780°С. Учитывая возможные в производстве отклонения от технологического режима, температура нагрева при отжиге может быть в диапазоне 775-785°С. Более широкий интервал температур не может быть допущен вследствие предъявляемого к структуре отожженной стали обязательного требования по однородности, а при широком интервале температур нагрева нельзя добиться получения однородного зернистого перлита [6-11].



- Рис. 2. Схема действующего утвержденного режима сфероидизирующего отжига маятникового типа для бунтового проката диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 (температура стадий выдержки: $T_2 = 650^{\circ}$ C; $T_4 = 780^{\circ}$ C; $T_6 = 620^{\circ}$ C; $T_8 = 780^{\circ}$ C)
- Fig. 2. Scheme of the current, approved mode of pendulum-type spheroidizing annealing for rolled steel with a diameter of 6,5 mm in coils ShH15 (temperature of exposure stages: $T_2 = 650^{\circ}$ C; $T_4 = 780^{\circ}$ C; $T_6 = 620^{\circ}$ C; $T_8 = 780^{\circ}$ C)

Таблица 1. Параметры стадий нагрев/охлаждение сфероидизирующего отжига по действующему режиму T a ble 1. Parameters of the heating/ cooling stages of spheroidizing annealing according to the current mode

| Параметры | Интервалы времени t_i (см. рис. 2) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|---------|-------|--------------------|
| | t_1 | t_2 | <i>t</i> ₃ | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | t_8 | t_9 |
| Температура нагрева/охлаждения, °С | 20-650 | 650 | 650-780 | 780 | 780-620 | 620 | 620-780 | 780 | 780-350 |
| Скорость нагрева/охлаждения, °С/ч | 60 | - | 45 | - | 40 | - | 50 | - | Охлаждение с печью |
| Время выдержки, мин | - | 10 | - | 90 | - | 30 | - | 100 | - |

Целью работы является исследование влияния временных этапов сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали диаметром 6,5 мм на процесс сфероидизации пластинчатого перлита с целью сокращения времени циклического отжига маятникового типа.

Материал и методика исследования

Металлографическое исследование образцов проводилось на катанке диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA GMS с энергодисперсионным микроанализатором AztecLive Automated Ultim Max 65. Прокатка проводилась по усовершенствованному режиму в проволочной линии и линии «Стелмор» мелкосортно-проволочного стана (МСПС) 370/150.

Исследования проводились после сфероидизирующего отжига стали по четырем экспериментальным режимам, к которой предъявлялись следующие требования согласно ГОСТ 801:

уровень обезуглероженного слоя (далее ОБС)
 не более 0,25 мм для стали диаметром от 4 до 15 мм;
 размер зернистого перлита – не более 4 балла;

 твердость горячекатаной отожженной стали 179–207 НВ. Сфероидизирующий отжиг проводился в лабораторной печи Maetherm A-125-1300. Определялось оптимальное время выдержек с целью уменьшения их длительности.

Проведение исследовательской работы было разделено на четыре экспериментальных режима с вариацией длительности интервалов выдержек (табл. 2). При этом температуры выдержек остались неизменными по отношению к базовому варианту.

Таблица 2. Параметры стадий выдержки сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам

T a ble 2. Parameters of the exposure stages of spheroidizing annealing by experimental modes

| Номер | Параметр | Интервалы времени <i>t</i> _i | | | | |
|--------------------|---------------------|---|-------|-------|-------|--|
| экспериментального | | (см. рис. 2) | | | | |
| режима | | t_2 | t_4 | t_6 | t_8 | |
| 1 | D | 9 | 81 | 27 | 90 | |
| 2 | время интервала, | 7,5 | 67,5 | 22,5 | 75 | |
| 3 | | 5 | 45 | 15 | 50 | |
| 4 | мин | 2,5 | 22,5 | 7,5 | 25 | |

Результаты исследования и их обсуждение

В более ранних работах [12, 13] на бунтовом прокате диаметром от 6,5 до 16,5 мм было изучено влия-

ние наличия участков грубопластинчатого перлита в подповерхностом слое на конечный результат после сфероидизирующего отжига. Прокатка осуществлялась согласно требованиям технологической инструкции по утвержденной таблице калибровки [14]. Для прокатки непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) сечением 250×300 мм использовался утвержденный [15] химический состав согласно требованиям ГОСТ 801. Режим термообработки в потоке линии «Стелмор»: начальное охлаждение водой до температуры 870-910°С в зоне виткообразователя и последующее охлаждение воздухом на роликовом конвейере тремя первыми вентиляторами с мощностью подачи 20% и замедленным охлаждением под термоколпаками (термоизолирующими крышками) до конца рольганга при скорости транспортирования 1,0 м/с.

Микроструктура после отжига имела для диаметра 6,5 мм зону частично обезуглероженного слоя ОБС с характерными участками: зоной ферритноперлитной структуры, зоной пластинчатого перлита при основной структуре зернистого перлита или зоной зернистого перлита, обедненной карбидами в подповерхностной зоне, что является несоответствием по ОБС (не более 0,25% от диаметра). Результаты исследования качественных показателей бунтового проката по ГОСТ 801 представлены в **табл. 3**.

- Таблица 3. Качественные показатели бунтового проката по ГОСТ 801 после прокатки по усовершенствованному режиму охлаждения и проведения сфероидизирующего отжига по действующему режиму
- Table 3. Quality indicators of coiled rolled steel according to GOST 801 after rolling under an improved cooling mode and spheroidizing annealing under the current mode

| Параметры | Требования ГОСТ 801 | Диаметр катанки, 6,5 мм | |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------|--|
| Уровень | От 4 до 15 мм | | |
| обезуглероженного | не более 0,25 мм | | |
| слоя, мм | Свыше | 0,31-0,46 | |
| | 15 до 30 мм | | |
| | не более 0,40 мм | | |
| Размер зернистого перлита | Не более 4 баллов | 2 | |
| Твердость, НВ | 179-207 | 180-194 | |

Для получения равномерной микроструктуры и стабильного ОБС при проведении сфероидизирующего отжига был разработан усовершенствованный режим поточной термообработки бунтового проката на линии «Стелмор». В основе разработки были положены результаты собственных исследований [16] и аналогичных научных работ [17-20]. Изменения касались ускоренного охлаждения витков в начале транспортера витков линии «Стелмор» с последующей выдержкой под термоэкранами (термоизолирующими крышками). Поскольку при быстром снижении температуры ниже 727°С скорость превращения увеличивается и достигает максимума при ~ 550°С, разработанный режим должен увеличить время и полноту структурных превращений с уменьшением межпластинчатого расстояния в перлите. Начальная температура охлаждения в зоне виткообразователя была принята равной 870 ± 20 °С (несколько выше температуры A_{cm}) как наиболее эффективная для формирования мелкодисперсной структуры без образования заметной карбидной сетки при разных скоростях охлаждения.

Исходная микроструктура проката диаметром 6,5 мм при таком режиме поточной термообработки была мелкодисперсной перлитной с межпластинчатым расстоянием 0,126-0,235 мкм и размером пластин цементита (Ц) не более 0,08 мкм.

По размеру зерен отчетливо определялись две зоны (**рис. 3**): периферийная (толщина 1,1–1,4 мм) мелкозернистая и центральная крупнозернистая. Поэтому в дальнейших исследованиях и анализе структурных превращений было принято выполнять их для обеих зон.

После прокатки и поточного охлаждения бунтового проката диаметром 6,5 мм из подшипниковой стали ШХ15 были обеспечены все качественные характеристики по ГОСТ 801, в том числе и повышение качественных показателей ОБС (минимизация участков остаточного пластинчатого перлита) (**рис. 4**).

Учитывая получение мелкодисперсной перлитной структуры на линии «Стелмор» и применямый далее циклический тип сфероидизирующего отжига бунтового проката диаметром 6,5 мм представляет интерес исследование влияния времени отжига на полноту структурных превращений при сфероидизации пластин цементита в глобули.

При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после отжига по режиму № 1 были получены следующие результаты (**рис. 5, а, б**):

 – размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2 балла;

– обезуглероженный слой на уровне 0,10-0,12 мм;

- твердость 183-191 HB.

Отклонений в качественных характеристиках металла от требований ГОСТ 801 не выявлено.

При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после отжига по режиму № 2 были получены следующие результаты (**рис. 5, в, г**):

 – размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2 балла;

обезуглероженный слой на уровне 0,10-0,14 мм;
 твердость 181-190 НВ.

Режим № 2 показал, что особенных отличий по микроструктуре и твердости в сравнении с действующим и экспериментальным режимом № 1 не обнаружено.

При исследовании образцов катанки диаметром 6,5 мм после проведенного отжига по режиму № 3 были получены следующие результаты (**рис. 5**, д, е):

 – размер зернистой структуры в отожженном состоянии 2-3 балла;

обезуглероженный слой на уровне 0,09-0,13 мм;
твердость 185-198 НВ.

Металлографический анализ показал, что отожженная микроструктура 2-3 балла и твердость металла выше, чем в экспериментах № 1, 2.



Рис. 3. Микроструктура катанки из стали ШХ15 диаметром 6,5 мм, $\times 500$ Fig. 3. Microstructure of wire rod from steel ShH15 with a diameter of 6,5 mm, $\times 500$



- Рис. 4. Микроструктура катанки диаметром 6,5 мм: а мелкодисперсный перлит после прокатки, ×20000; б, в периферийная и центральная зоны после отжига, ×20000
- Fig. 4. Microstructure of wire rod with a diameter of 6,5 мм: a is fine perlite after rolling, ×20000; б, в are periphery and central zones after annealing, ×20000



- Рис. 5. Микроструктура образцов после проведения сфероидизирующего отжига: а, б периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 1; в, г периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 2; д, е периферийная и центральная зоны после отжига по режиму № 3, ×20000
- Fig. 5. Microstructure of the samples after spheroidizing annealing: a, 6 are periphery and central zones after annealing by mode No. 1; B, Γ are periphery and central zones after annealing by mode No. 2; д, e are periphery and central zones after annealing by mode No. 3, ×20000

Исследования образцов катанки диаметром 6,5 мм после проведенного 4-го режима (рис. 6) показали:

 неудовлетворительный размер зернистой структуры в отожженном состоянии 7-8 баллов ГОСТ 801;

 неудовлетворительный размер обезуглероженного слоя на уровне 0,39-0,56 мм;

- неудовлетворительная твердость 202-215 HB.

При исследовании образцов после проведенного отжига по режиму № 4 видно, что происходит изменение характера цементитных кристаллов, возникающих при распаде аустенита.

Получена структура с заметным количеством пластинчатого цементита (микроструктура 7-8 баллов). Обезуглероженный слой и твердость не соответствуют требованиям ГОСТ 801.

Анализ влияния длительности времени выдержек при циклическом (маятниковом) отжиге на микроструктуру металла после отжига (формирование сфероидизированного перлита) показал, что режимы № 1–3 обеспечивают полную трансформацию пластин карбида железа в глобули.

После отжига по режиму № 4 эффект формирования структуры зернистого перлита не достигнут. Подтверждением этого положения служит тот факт, что в случае кратковременной выдержки с последующим медленным охлаждением в микроструктуре присутствуют фрагменты и сплошные прослойки пластинчатого цементита по границам крупных исходных аустенитных зерен. При этом дробления пластин не произошло, что свидетельствует об одностадийной схеме трансформации.

Для того чтобы сформировать структуру аустенита, необходимо четко регулировать важнейшие параметры стадии сфероидизирующего отжига. Продолжительность выдержки при температуре отжига выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить необходимую полноту превращения перлита в аустенит, а



также максимально выровнять температуры во всем объеме металла. Если форма выделения карбидов, зависящая от состояния аустенита, определяется температурой отжига металла, то величина выделившихся карбидов, дисперсность карбидной фазы, определяется скоростью охлаждения. В исследованиях показано, что температура и скорость охлаждения во всех режимах одинакова. Итак, установлены зависимости формирования структуры от технологических параметров в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150, определена эффективная выдержка для глобулярной формы выделения карбидов при постоянных параметрах температуры и скорости охлаждения при сфероидизации.

Определена роль циклического сфероидизирующего отжига с уточненным временем выдержки при эффективных подкритических температурах в области эффективных температур нагрева (620–780°С) в области подкритических температур.

Полученный в ходе лабораторных исследований опыт позволяет перейти к промышленному внедрению разработанной технологии.

Выводы

1. Получение мелкодисперсного пластинчатого перлита в исходной микроструктуре бунтового проката из стали ШХ15 обеспечивает существенное (до 50%) снижение времени циклического сфероидизирующего отжига.

2. При недостаточном времени выдержек (режим № 4) сфероидизация пластин карбидов железа не происходит, однако их дробление также не обнаружено. Это свидетельствует о том, что сфероидизация мелкодисперсного перлита происходит в одну стадию – непосредственно при трансформации пластин в глобули.



Рис. 6. Микроструктура образцов после проведения сфероидизирующего отжига по режиму № 4: а – периферийная зона; б – центральная зона, ×20000

Fig. 6. Microstructure of the samples after spheroidizing annealing by mode No. 4: a is periphery zone; δ is central zone, ×20000

Список источников

- 1. Долженков И.Е., Долженков И.И. Сфероидизация карбидов в стали. М.: Металлургия, 1984. 143 с.
- Гуляев А.П. Термическая обработка стали. 2-е изд. М.: Машгиз, 1960. 495 с.
- 3. Накано Т., Каватани Х. О росте сфероидизации карбидов в высокоуглеродистой и низколегированной стали // Тэцу то хаганэ. 1972. Т. 58. №. 14. С. 2012.
- Долженков И.Е. Пути существенного сокращения времени (продолжительность) и улучшения качества сфероидизации карбидов в стальной металлопродукции // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. 2011. №. 58. С. 262-267.
- Bhadeshia H. Steels for bearings // Progress in materials Science. 2012, vol. 57, no. 2, pp. 268-435.
- Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: учеб. пособие. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 495 с.
- 7. Качество катанки подшипниковой стали после двухстадийного охлаждения / Яценко Ю.В., Емченко В.С., Реус В.А., Лихов В.К. // Сталь. 1985. №. 6. С. 62-63.
- Оптимизация технологии отжига ускоренно охлажденной ШХ15 / Ляшенко В.П. и др. // Сталь. 1989. №. 6. С. 71-74.
- Влияние параметров сфероидизирующего отжига на структуру подшипниковой стали / Салтыков Л.Н., Климушкина Л.А., Куликов М.С. и др. // Сталь. 2003. №4. С.64-65.
- Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали.
 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978.
 277 с.
- 11. Зинченко С.А., Ибрагимов А.У. Термоциклический сфероидизирующий отжиг подшипниковой стали // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 19–20 марта 2015 года. В 4-х т. / отв. ред. Горохов А.А. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. Т. 2. С. 144-147.
- Влияние исходной структуры бунтового проката из подшипниковой марки стали на равномерность получения структуры после сфероидизирующего отжига / Савченко С.А., Ковалева И.А., Гузова И.А., Сычков А.Б. // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 3. С. 251-260. DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260.
- 13. Влияние структуры бунтового проката из подшипниковой стали на его структуру и поверхностное обезуглероживание после сфероидизирующего отжига / Савченко С.А., Ковалева И.А., Гузова И.А., Сычков А.Б. // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. 2022. № 21. С. 133-144.
- 14. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / Путеев В.С., Савченко С.А., Панковец И.А., Возная В.И., Астапенко И.В. // Литье и металлургия.

2021. № 3. C. 65-73. DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.

- 15. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / Панковец И.А., Савченко С.А., Возная В.И. и др. // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 7. С. 804-810. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
- 16. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / Савченко С.А., Ковалева И.А., Астапенко И.В., Сычков А.Б. // Черные металлы. 2024. № 4. С. 65-73. DOI: 10.17580/chm.2024.04.05
- Study on rolling and hot delivery spheroidizing annealing of GCr15 bearing steel / Huang Z. Y., Du L. X., Li M. Z. et al. // J. of Materi Eng and Perform. 2023, vol. 32, pp. 7779-7784. DOI: 10.1007/s11665-022-07656-w.
- Design of online spheroidization process for 1.0C-1.5Cr bearing steel and microstructure analysis / Li Z. X., Li C. S., Ren J. Y. et al. // Metall. Mater. Trans. A. 2018, vol. 49, pp. 1782-1794. DOI: 10.1007/s11661-018-4511-9.
- Effects of annealing on carbides size and distribution and cold formability of 1.0C-1.5Cr bearing steel / Li Z. X., Li C. S., Zhang J. et al. // Metall. Mater. Trans. A. 2015, vol. 46, pp. 3220-3231. DOI: 10.1007/s11661-015-2904-6.
- Effect of prior microstructures on cementite dissolution behavior during subcritical annealing of high carbon steels / Zhao X.-Yu, Zhao X.-M., Dong C., Yang Y., Han H. // Metals and Materials International. 2022, vol. 28, iss. 6, pp. 1315–1327. DOI: 10.1007/s12540-021-00983-y.

References

- 1. Dolzhenkov I.E., Dolzhenkov I.I. *Sferoidizaciya karbidov v stali* [Spheroidization of carbides in steel]. Moscow: Metallurgy, 1984, 143 p. (In Russ.)
- 2. Guliaev A.P. *Termicheskaya obrabotka stali* [Heat treatment for steel]. Moscow: Mashgiz, 1960, 495 p. (In Russ.)
- Nakano T., Kavatani H. Growth of spheroidization of carbides in high carbon and low alloyed steel. *Tecu to hagane* [Tetsu-to-Hagané], 1972;58(14):2012. (In Russ.)
- Dolzhenkov I.E. Ways to significantly reduce the time (duration) and improve the quality of spheroidization of carbides in steel products. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Starodubovskie chteniya* [Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Starodubov readings], 2011;(58):262-267. (In Russ.)
- 5. Bhadeshia H. Steels for bearings. Progress in materials Science. 2012;57(2):268-435.
- Smirnov M.A., Schastlivtsev B.M., Zhuravliov L.G. Osnovy termicheskoy obrabotki stali: ucheb.posobie [Basics of heat treatment for steel: study guide]. Yekaterinburg: Ural division of the Russian Academy of Science, 1999, 495 p. (In Russ.)
- Yatsenko Y.V., Emchenko V.S., Reus V.A., Lihov V. K. Quality of wire rod from bearing steel after two-step cooling. *Stal* [Steel], 1985;(6):62-63. (In Russ.)

- Liashenko V.P. et al. Optimization of the annealing technology for quickly cooled ShH15. *Stal* [Steel], 1989;(6):71-74. (In Russ.)
- Saltykov L.N., Klimushkina L.A., Kulikov M.S. et al. Influence of parameters of spheroidizing annealing on the structure of bearing steel. *Stal* [Steel], 2003;(4):64-65. (In Russ.)
- Rauzin Y.R. *Termicheskaya obrabotka hromistoy stali* [Heat treatment for chromium steel]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, 277 p. (In Russ.)
- Zinchenko S.A., Ibragimov A.U. Thermocyclic spheroidizing annealing for bearing steel. Sovremennye instrumentalnye sistemy, informatsionnye tekhnologii I innovacii: sb. nauch. tr. XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Modern instrumental systems, information technologies and innovations. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference]. Kursk: CJSC University Book, 2015, pp. 144-147. (In Russ.)
- 12. Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B. Influence of the initial structure of rolled steel in coils made of bearing steel on the uniformity of the structure obtained after spheroidizing annealing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2023;79(3):251-260. (In Russ.)DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-251-260.
- 13. Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Guzova I.A., Sychkov A.B. Influence of the structure of coiled steel products made of bearing steel on its structure and surface decarburization after spheroidizing annealing. *Tekhnologii metallurgii*, *mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing], 2022;(21):133-144. (In Russ.)
- 14. Puteev V.S., Savchenko S.A., Pankovets I.A., Voznaya V.I., Astapenko I.V. Improving the technological process

for production of bearing steel at mill 370/150. *Litie i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2021;(3):65-73. (In Russ.) DOI: 10.21122/1683-6065-2021-3-65-73.

- Pankovets I.A., Savchenko S.A., Voznaya V.I. et al. Study of factors contributing to the reduction of carbide heterogeneity in bearing steel. *Chernaya metallurgiya*. *Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2021;77(7):804-810. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810.
- Savchenko S.A., Kovaliova I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Features of the formation of finely dispersed structure of rolled products from bearing steel. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2024;(4):65-73. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2024.04.05
- Huang Z.Y., Du L.X., Li M.Z. et al. Study on rolling and hot delivery spheroidizing annealing of GCr15 bearing steel. J. of Materi Eng and Perform. 2023;32:7779-7784. DOI: 10.1007/s11665-022-07656-w.
- Li Z.X., Li C.S., Ren J.Y. et al. Design of online spheroidization process for 1.0C-1.5Cr bearing steel and microstructure analysis. Metall. Mater. Trans. A. 2018;49:1782-1794. DOI: 10.1007/s11661-018-4511-9.
- Li Z.X., Li C.S., Zhang J. et al. Effects of annealing on carbides size and distribution and cold formability of 1.0C-1.5Cr bearing steel. Metall. Mater. Trans. A. 2015;46:3220-3231. DOI: 10.1007/s11661-015-2904-6.
- Zhao X.-Yu, Zhao X.-M., Dong C., Yang Y., Han H. Effect of prior microstructures on cementite dissolution behavior during subcritical annealing of high carbon steels. Metals and Materials International. 2022;28(6):1315-1327. DOI: 10.1007/s12540-021-00983-y.

Поступила 21.06.2024; принята к публикации 23.08.2024; опубликована 28.03.2025 Submitted 21/06/2024; revised 23/08/2024; published 28/03/2025

Савченко Сергей Александрович – ведущий инженер-технолог прокатного отдела технического управления, Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь. Email: gnp.tu@bmz.gomel.by

Ковалёва Ирина Анатольевна – начальник исследовательской лаборатории исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного производств технического управления, Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», Жлобин, Беларусь. Email: nl.icm@bmz.gomel.by

Астапенко Игорь Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры металлургии и технологии обработки материалов, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь. Email: astapenko@tut.by. ORCID 0000-0001-5503-7693.

Сычков Александр Борисович – доктор технических наук,

профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Reseacher ID: E-4516-2016.

Sergey A. Savchenko – Senior Technical Engineer of the Rolling Unit of the Technical Department, Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus.

Email: gnp.tu@bmz.gomel.by

Irina A. Kovaliova – Head of the Research Laboratory of the Research Center, the Branch Laboratory of Metallurgical and Steel–wire Production Technologies of the Technical Department, Belarusian Steel Works, the management company of the Belarusian Metallurgical Company holding, Zhlobin, Belarus. Email: nl.icm@bmz.gomel.by

Email: nl.1cm@bmz.gomel.by

Igor V. Astapenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy and Materials Processing Technology,

Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus. Email: astapenko@tut.by. ORCID 0000-0001-5503-7693.

Alexandr B. Sychkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Reseacher ID: E-4516-2016.