

**ОПТИМИЗАЦИЯ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО ОТЖИГА  
БУНТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СТАЛИ ШХ15  
В УСЛОВИЯХ СОРТОПРОКАТНОГО ЦЕХА № 2  
ОАО «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

**С. А. Савченко**

*Открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» –  
управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания»,  
г. Жлобин*

**Г. А. Слепнев**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Представлены результаты исследований по усовершенствованию циклического (маятникового) сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали ШХ15. 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 0,8 мкм.*

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

Цель работы – усовершенствование режима сфероидизирующего отжига в лабораторной печи и его апробация в поточном производстве в промышленной печи.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- теоретическое обоснование целесообразности работы;
- разработка экспериментальных режимов сфероидизирующего отжига в лабораторной печи Maetherm A-125-1300;
- исследование и анализ микроструктуры, полученных механических свойств.
- апробация результатов исследований в промышленной печи KL-11;
- формулирование выводов и рекомендаций производству.

Поскольку процесс сфероидизирующего отжига является значительно более длительным и энергозатратным в сравнении с другими технологическими этапами производства подшипниковых сталей, возможность сокращения времени такого отжига является актуальным. При заданном размере глобулей карбида железа требует время выдержек, которое напрямую зависит от исходных размеров пластин цементита и межпластинчатого расстояния в перлите бунтового проката до сфероидизации.

В работе 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 после гомогенизирующего отжига непрерывнолитых заготовок [1, 2], позволяющему получить исходную мелкодисперсную перлитную структуру с межпластинчатым расстоянием 0,126–0,235 мкм и размером пластин цементита не более 0,8 мкм [3, 4].

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. 1) [5].

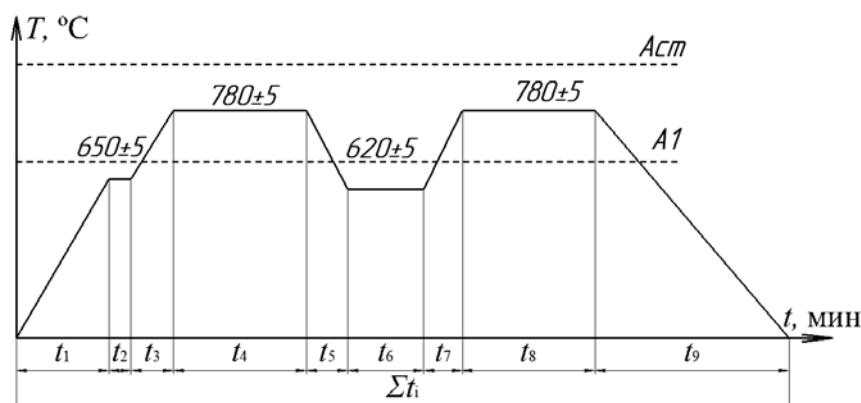


Рис. 1. Схема действующего, утвержденного режима сфероидизирующего отжига маятникового типа для бунтового проката из стали ШХ-15

Эффективные температуры нагрева для отжига – 780–810 °С и охлаждение в области подкритических температур 620–650 °С утвержденного режима представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Параметры стадий нагрев/охлаждение сфероидизирующего отжига по штатному режиму**

| Параметры                           | Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1) |         |         |         |         |         |         |         |                    |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
|                                     | $t_1$                                |         | $t_3$   | $t_5$   | $t_7$   | $t_9$   |         |         |                    |
| Температура нагрева/охлаждения, °С  | 20–350                               | 350–450 | 450–650 | 650–780 | 780–620 | 620–780 | 780–600 | 600–450 | 450–350            |
| Скорость нагрева/охлаждения, °С/час | 100                                  | 70      | 60      | 45      | 40      | 50      | 40      | 40      | Охлаждение с печью |

Таблица 2

**Температура стадий выдержки сфероидизирующего отжига по базовому режиму**

| Параметры                | Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1) |       |       |       |
|--------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
|                          | $t_2$                                | $t_4$ | $t_6$ | $t_8$ |
| Температура выдержки, °С | 650                                  | 780   | 620   | 780   |

**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 и ТО проводились по усовершенствованному режиму в проволочной линии и линии Стелмор мелкосортно-проволочного стана (МСПС) 370/150.

Исследования проводились на катанке диаметром 6,5 мм из стали ШХ15 после сфероидизирующего отжига 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;

– микроструктура горячекатаной отожженной стали – не более 4 баллов;

– твердость горячекатаной отожженной стали 179–207 НВ.

Сфероидизирующий отжиг проводился в лабораторной печи Maetherm A-125-1300.

Проведение исследовательской работы было разделено на четыре экспериментальных режима с вариацией длительности интервалов выдержек, представленных в табл. 3. При этом температуры выдержек остались неизменными по отношению к базовому варианту (табл. 3).

Таблица 3

**Параметры стадий выдержки сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам**

| Номер экспериментального режима | Параметр                             | Интервалы времени $t_i$ (см. рис. 1) |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                 |                                      | $t_2$                                | $t_4$ | $t_6$ | $t_8$ |
| 1                               | Время интервала, процент от базового | 90                                   |       |       |       |
| 2                               |                                      | 75                                   |       |       |       |
| 3                               |                                      | 50                                   |       |       |       |
| 4                               |                                      | 25                                   |       |       |       |

**Результаты исследования и их обсуждение.** Микроструктура после отжига имела зону частично обезуглероженного слоя ОБС (далее – ОБС) с характерными участками: зоной феррито-перлитной 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 1 % от диаметра). Результаты исследования качественных показателей бунтового проката по ГОСТ 801 представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Качественные показатели бунтового проката по ГОСТ 801 после прокатки по усовершенствованному режиму охлаждения и проведения штатного сфероидизирующего отжига**

| Параметры   | Номер экспериментального режима |          |          |           |
|---|---------------------------------|----------|----------|-----------|
|   | 1                               | 2        | 3        | 4         |
| Уровень обезуглероженного слоя  | 0,1–0,10                        | 0,1–0,14 | 0,1–0,10 | 0,39–0,45 |
| Микроструктура горячекатаной отожженной стали, балл зернистого перлита (ЗП) | 2                               | 2        | 2–3      | 7–8       |
| Твердость, НВ   | 183–191                         | 181–190  | 185–198  | 202–215   |

Анализ влияния усовершенствованного режима отжига (формирование сфероидизированного перлита) на микроструктуру проката 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.

Результаты исследования:

При апробации результатов исследований проведен сфероидизирующий отжиг бунтов катанки д.6,5 в штатной проходной печи KL-11 по режиму № 2. После отжига получены следующие результаты:

- размер зерен не превысил 2 баллов по всем образцам;
- толщина обезуглероженного слоя – 0,24 мм;
- твердость составила 184–190, что с запасом удовлетворяет требованиям ГОСТ 801.

Внедрение режима сфероидизирующего отжига № 2 позволит снизить затраты при проведении сфероидизирующего отжига на 101 руб./т.

#### Л и т е р а т у р а

1. Астапенко, И. В. Анализ влияния гомогенизирующего отжига блюмов подшипниковых марок стали на качество проката / И. В. Астапенко, С. А. Савченко // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 100–102.
2. Савченко, С. А. Оценка эффективности режимов гомогенизирующего отжига подшипниковых марок сталей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / С. А. Савченко, В. И. Возная, И. В. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – С. 52–61.
3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и экон. информ. – 2021. – № 77 (7). – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Совершенствование технологического процесса производства подшипниковых марок стали на стане 370/150 / В. С. Путеев [и др.] // Литье и металлургия. – 2021. – № 3. – С. 65–73. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-65-73>
5. Особенности формирования мелкодисперсной структуры бунтового проката подшипниковой стали / С. А. Савченко [и др.] // Черные металлы. – 2024. – № 4. – С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.04.05>

## РЕЦИКЛИНГ ШЛАКОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Н. В. Синенький**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Представлены результаты исследований возможностей рециклинга металлосодержащей части шлаков сталеплавильных печей. Установлено, что наиболее перспективной технологией, позволяющей обеспечить комплексную переработку и рециклинг с максимальной эффективностью в условиях нашей страны, является строительство специализированных участков переработки и рециклинга с применением в качестве базового агрегата ротационных печей.*

**Ключевые слова:** шлаки, рециклинг, экология, утилизация, металлосодержащие, моделирование, анализ.

В условиях все возрастающего мирового дефицита на металлические шихтовые материалы и постоянного увеличения их стоимости работы, связанные с утилизацией и рециклингом отходов, имеют не только национальную, но и общемировую актуальность.