

**В. В. ФИЛИППОВ**, канд. техн. наук (РУП БМЗ),  
**В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**Г. А. АНИСОВИЧ**, акад., д-р техн. наук (НАНБ\*),  
**И. Л. НУМЕРАНОВА**, **Н. Л. МАНДЕЛЬ**, канд. техн. наук,  
**Д. В. ЛЕНАРТОВИЧ** (БНТУ)

## **ОСВОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА БЕЛОРУССКОЙ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ**

Шарикоподшипниковые стали относятся к классу заэвтектоидных сталей, которые своим химическим составом и термообработкой обеспечивают прежде всего высокую износоустойчивость. На изнашивание элементов подшипников в процессе эксплуатации влияет большое количество взаимосвязанных факторов, что обуславливает крайнюю сложность получения комплекса требуемых показателей качества. Эти требования нельзя характеризовать обычно принятыми показателями механических свойств и микроструктуры, так как напряжения, возникающие в металле в условиях эксплуатации подшипника, и протекающие при этом явления разрушения с большим трудом поддаются теоретическому анализу или расчету.

В литературе имеется достаточно данных, описывающих технологию получения литого металла в слитках или непрерывнолитых заготовках и производства готового сортового проката или проволоки из сталей типа ШХ. Основные производители этих сталей – Златоустовский завод, Кузнецкий металлургический комбинат, Оскольский электрометаллургический комбинат, Череповецкий металлургический комбинат, заводы «Днепрспецсталь» и «Электросталь». На стадии прокатного передела основное внимание уделялось отработке технологии гомогенизирующего нагрева стали, обеспечению условий деформации и термообработки с целью получения требуемой микроструктуры и фазового состава.

На БМЗ сталь ШХ15 впервые была выплавлена и разлита в непрерывнолитую заготовку в 1991 г. Однако уровень внепечной обработки того времени не позволял обеспечить требования по макроструктуре непрерывнолитого металла и однородности свойств по сечению заготовки. Были отмечены и значительные дефекты поверхности после разливки.

В рамках выполнения научно-исследовательских работ между Белорусским национальным техническим университетом и БМЗ в 2001 г. была разработана комплексная технология производства подшипниковой стали в условиях БМЗ. На первом этапе необходимо было получить непрерывнолитую заготовку, соответствующую по показателям качества ГОСТ

---

\* Национальная академия наук Беларуси.

801–78, а затем попытаться обеспечить производство передельной заготовки сечением 125×125 мм для последующего переката на заводах, производящих специальные, качественные стали. Опытная плавка № 32523 стали ШХ15СГ была проведена на БМЗ 20.07.2001 г. в ДСП № 3 и после обработки на установке печь-ковш и вакууматоре разлита на МНЛЗ № 3 в заготовку сечением 250×300 мм. Затем из этой стали на стане 850 был прокатан сортовой круг диаметром 115 мм.

Конечный химический анализ по разливочной пробе из середины плавки № 32523: углерод – 0,994%, кремний – 0,512, марганец – 1,009, хром – 1,367%. Остальные элементы в виде примесей не превышали требований ГОСТ 801–78.

После разливки металл порезали на заготовки длиной 5300 мм и штабелировали на складе заготовок; охлаждение под колпаком происходило в течение 24 ч. От плавки отобрали пробы непрерывнолитой заготовки сечением 250×300 мм для оценки макроструктуры. После фрезерования и травления поверхности темплетов было проведено сравнение свежепротравленных образцов с эталонами шкал стандарта ОСТ 14-1-235–91. Результаты металлографического анализа показали, что в образцах нет межкристаллитных трещин и ликвационных полосок, осевая ликвация на одном образце оценена баллом 2,5 и на другом – 1,0. Отмечалось сосредоточение пор 4 и 1,5 балла вблизи теплового центра в зоне встречи фронта затвердевания. Единичные мелкие включения диаметром до 1 мм, располагающиеся под поверхностью, оценивались по шкале «краевое точечное загрязнение» – 0,5 балла. Наружная мелкозернистая корочка состоит из дезориентированных мелких кристаллов глубиной залегания 8 мм. Зона столбчатых кристаллов в образцах в среднем составляет 85×75 мм. На поверхности заготовок раковин от налипания шлака, раздутия или вогнутости по поперечному сечению не наблюдалось.

Заготовки были посажены в холодном состоянии в подогревательную печь и нагревались по режиму для четвертой группы марок сталей по ТИ 840-П2-01–2000. Заготовки находились в подогревательной печи 1 ч, после чего при температуре поверхности 765 и 811 °С были пересажены в нагревательную печь. Режим нагрева представлен в табл. 1.

Анализ температуры нагрева металла свидетельствует о том, что длительность нагрева металла в нагревательной печи и температуры по зонам соответствовали требованиям ТИ 840-П2-01–2000. Температура нагрева металла по зонам находилась ближе к нижнему пределу, за исключением нижней зоны в конце печи перед выдачей металла.

Учитывая большое количество экспериментальных данных и результаты числовых расчетов по математической модели [1], можно с достаточной точностью определить, что температура поверхностных слоев заготовки составляла в момент выдачи 1180 °С, среднемассовая температура

Таблица 1

## Режим нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи стана 850

Температура нагрева в печи по зонам, °С							Время нагрева, час:мин		
1	2	3	4	5	6	7	мин.	макс.	сред.
1150	1135	1180	1215	1185	1220 1200	1200 1195	2:34	2:40	42:37
Требование ТИ 840-П2-01-2000									
1110 – 1180	1110 – 1180	1150 – 1220	1190 – 1260	1170 – 1240	1180 – 1250	1150 – 1220	1:30	3:10	–
Рекомендуемый режим нагрева металла по зонам печи по плану работ									
1110 – 1160	1110 – 1160	1150 – 1200	1190 – 1240	1170 – 1220	1180 – 1230	1150 – 1200	2:00	2:30	–

по сечению заготовки – в пределах 1172 – 1174 °С. Отбор окалины после печного нагрева не производился, но было отмечено, что она хорошо удаляется с поверхности заготовки при гидросбиве и в процессе деформации.

Прокатка непрерывнолитых заготовок на круг диаметром 115 мм производилась в соответствии с действующей технологической инструкцией ТИ 840-П2-01–2000 по схеме калибровки в 9 проходов. В процессе прокатки регистрировались температура поверхности раската в каждом пропуске, момент и усилие прокатки.

После прокатки полученные раскаты были порезаны на пиле горячей резки на заготовки длиной  $12\,000 \pm 100$  мм. После раскроя металл охлаждался на реечном холодильнике. Проба на технологическую осадку, отобранная из одного из раскатов, дала положительный результат. При осмотре поверхности раскатов дефектов поверхности не обнаружено. Все требования ГОСТ 801–78 по макро- и микроструктуре отобранных образцов были обеспечены.

Результаты основного показателя механических свойств проката в состоянии поставки (горячекатаный неотожженный прокат) свидетельствуют о достаточно высокой однородности свойств: среднее значение твердости  $356 \pm 6$  НВ. Абсолютное отклонение от среднего значения 1,6%.

Опытная партия заготовок круга диаметром 115 мм и длиной 6 м в количестве 12 штук (5,570 т) была отгружена для проведения испытаний на ОАО «Минский подшипниковый завод».

Акт испытаний на МПЗ констатировал, что для штамповки колец подшипников 3626.01 и 3626.02 возможно использование проката диаметром 115 мм из стали ШХ15СГ производства БМЗ.

Из заключения также следует, что на дополнительно отобранных пробах качество металла соответствует требованиям ГОСТ 801–78 и не отличается от данных БМЗ. По всем показателям макро- и микроструктуры имеется достаточный запас качества, что свидетельствует о правильном подходе к разработке опытной технологии.

Контроль микроструктуры, проведенный на поперечных темплатах сортового проката, показал, что центральная пористость составила 1,0 балла при норме 2,0 балла; точечная неоднородность – в среднем 0,75 балла при норме 2,0 балла; ликвационный квадрат при норме 0,5 балла отсутствует. В микроструктуре металла не обнаружено дефектов в виде усадочной раковины, флокенов, инородных включений. Неметаллические включения: оксиды при норме не более 3 баллов составили в среднем 1,83 балла; сульфиды при норме не более 3,0 – в среднем 1,41; глобулы при норме 2,5 – 1,41; микропористость при норме 3 балла – в среднем 0,33 балла. Отмечено превышение фактического содержания в стали кислорода, которое равно 0,006%. В соответствии с требованиями изменения № 6 ГОСТ 801–78 от 01.02.2002 г. массовая доля кислорода в стали должна

быть не более 0,0015%. Норма массовой доли кислорода не является браковочным признаком до 01.01.2004 г.

Следует заметить, что наибольшее опасение при изготовлении горячекатаного сортового проката вызывало возможное наличие карбидной неоднородности. Анализ этого показателя на МПЗ свидетельствует о том, что при норме структурной полосчатости не более 4,0 балла на шести образцах опытной технологией обеспечивается 3 балла. Карбидная ликвация отсутствует при норме не более 3,0 балла. Другие показатели также имеют запас по качеству.

Проведенные исследования на БМЗ и МПЗ свидетельствуют о технической возможности производства сталей для шарикоподшипников в виде непрерывнолитой заготовки и сортового проката. Выдвинуто предположение о возможности более глубокого передела этой стали в катанку и проволоку. Главной проблемой ее производства в условиях БМЗ следует ожидать наличие карбидной неоднородности, для ликвидации которой потребуются установка дополнительного оборудования для ускоренного охлаждения проката после стана 850.

В заэвтектидных сталях при медленном охлаждении в области сердцевины литой заготовки наблюдается сегрегация карбидов. После придания формы прокату в горячем состоянии при охлаждении, как правило, образуется сетка карбидов; это явление следует ослаблять специальными мерами воздействия на прокат. Наиболее интенсивно на изменение карбидной сетки влияет ускоренное подстуживание после прокатки. Если металл ускоренно охлаждается от температуры 850 – 820 °С до 700 °С, то карбидная сетка снижается на 1,0 – 1,5 балла. Карбидное превращение начинается при 750 и заканчивается при 700 °С, а при 675 – 750 °С начинается ферритное превращение. Быстрое охлаждение стали в этом интервале не опасно, так как образующиеся внутренние напряжения релаксируют вследствие достаточной пластичности стали. Обеспечить температуру конца прокатки в пределах 850 °С возможно лишь при выдаче заготовки из печи в прокат с температурой не выше 1120 °С. Однако прокатка подшипниковых сталей при таких низких температурах затруднена.

Охлаждение проката ниже 700 °С ведется замедленно вследствие опасности образования трещин из-за повышенной флокочувствительности подшипниковой стали. Поэтому дальнейшее охлаждение необходимо проводить либо на спокойном воздухе в штабелях, либо длительное время (до 72 ч) в неотапливаемых колодцах.

Температурная обработка стали типа ШХ включает также смягчающий сфероидизирующий отжиг, при котором обеспечивается растворение карбидной фазы в аустените и образование зернистого перлита. Это явление подтвердили заводские испытания на наличие карбидной сетки в горячекатаном металле, которая соответствовала 5 баллам, и в этих же образцах после отжига карбидная сетка соответствовала 3 баллам шкалы № 4 ГОСТ 801–78. Ячеистость и сетчатость остаются нежелательными неоднородностями, но полностью их избежать нельзя.

В случаях, когда ожидается повышенный балл карбидной сетки, целесообразен повторный отжиг, возможный при более низкой температуре (780 °С), что дает некоторую экономическую выгоду. При проведении повторного отжига возможно снижение карбидной сетки на 0,5 балла.

На основе опубликованных данных по Ижевскому, Златоустовскому заводам, а также «Серп и молот», «Днепроспецсталь» можно сделать следующие выводы по технологии термообработки горячекатаной стали ШХ15СГ в прутках. В основном это нагрев до 790 °С, выдержка 12 ч, охлаждение до 630 °С со скоростью 40 °С/ч, затем охлаждение на воздухе. Увеличение длительности отжига на 8 – 10 ч снижает карбидную сетку на 0,5 балла. Повышение температуры отжига с 790 до 820 °С практически не сказывается на снижении карбидной сетки.

Таким образом, испытания опытной партии подшипников 3626.01 и 3626.02, изготовленных на МПЗ, свидетельствуют о возможности производства шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ в условиях БМЗ.

Целесообразно проведение дальнейших исследований, направленных на более глубокую переработку непрерывнолитых заготовок, включая катанку и проволоку различных диаметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах: Учеб. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1992. – 316 с.

УДК 669.04:536.244

**В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (БНТУ)  
**Ю. С. ПОСТОЛЬНИК**, д-р техн. наук (ДГТУ)\*,  
**С. М. КОЗЛОВ**, канд. техн. наук (БНТУ),  
**Ю. Н. ЗИНЧЕНКО** (ДГТУ), **П. Э. РАТНИКОВ** (БНТУ),  
**В. А. ТРУСОВ** (ДМК им. Дзержинского\*\*)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТЕРМИЧЕСКИ МАССИВНЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Нагрев металла в противотоке с печными газами довольно широко распространен в промышленном производстве. Развитие научной мысли в этом направлении берет свое начало с середины XX века. К исследованию этого весьма актуального вопроса неоднократно обращались многие уче-

\* Днепродзержинский государственный технический университет.

\*\* Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского (Украина, г. Днепро-дзержинск).