

**2. Pistorius, Chris.** Examples of How Fundamental Knowledge can Improve Steelmaking: Desulphurisation Kinetics Calcium and Modification / Chris Pistorius, Debduitta Roy, Neerav Verma // Technical paper // Received: 24 January 2013 /Accepted: 5 May, 2013. – Indian Institute of Metals, 2013.

**3. Динамическая** модель по внепечной обработке. Руководство пользователя 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://steeluniversity.org>.

*УДК 669.18-412*

**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук,  
**И.А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**В.А. МАТОЧКИН**, канд. техн. наук,  
**С.М. КАБИШОВ**, канд. техн. наук (Минпром)

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ**

Получение шарикоподшипниковых марок стали в большинстве своем осуществляется на заводах специальных сталей с последующей разливкой жидкой стали в крупные слитки. Ранее авторами совместно с д.т.н. Ю.А. Самойловичем были опубликованы материалы экспериментальных исследований разливки шарикоподшипниковой стали в крупные блюминговые слитки [1]. Вместе с тем, начиная с 1998 г., на Белорусском металлургическом заводе начато освоение стали марок ШХ15, ШХ15СГ для получения машиностроительных кругов диаметром 80–115 мм [2] по сквозной технологии, включая выплавку в ДСП-100, внепечную обработку стали на УВОС, разливку непрерывнолитых заготовок на МНЛЗ-2, нагрев и прокатку на стане 850\*.

Одним из важнейших вопросов при получении заготовки требуемого качества является определение рациональных режимов раз-

---

\* В разработке комплексной технологии принимали участие специалисты РУП «БМЗ» канд-ты техн. наук Филиппов В.В., Гуляев М.П., Фоменко А.П. и др.

ливки заготовок сечением 250×300 мм на машине непрерывного литья заготовок, включая выбор скорости разливки, параметров электромагнитного перемешивания, расхода воды в зоне вторичного охлаждения и других факторов.

Шарикоподшипниковая сталь по составу и свойствам близка к инструментальным, вместе с тем, она имеет широкий интервал кристаллизации, что требует учета взаимосвязанных процессов, происходящих при кристаллизации и затвердевании заготовки в условиях МНЛЗ. К ним в первую очередь следует отнести:

1. Процессы, протекающие в двухфазной зоне, при этом особое внимание следует уделять определению границ двухфазной зоны и свойств металла в данной области с учетом ликвации различных элементов. При этом, согласно литературным данным (например, [3]), концентрации легирующих и примесей существенно изменяются лишь в осевой зоне.

2. Условия охлаждения заготовки в кристаллизаторе с учетом особенностей конструкции МНЛЗ и применяемой технологии разливки (при определении плотности теплового потока следует учитывать термические сопротивления области прослойки ШОС и образующегося газового зазора, амплитуды качания кристаллизатора и т.д.).

3. Условия охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Следует отметить, что процесс охлаждения в ЗВО сложно описать с помощью математических зависимостей. Это обусловлено влиянием значительного числа факторов на интенсивность отвода тепла от поверхности металла. В общем случае помимо способа охлаждения на коэффициенты теплообмена между поверхностью заготовки и окружающей средой оказывают влияние конструкция и характеристики форсунок, расстояние от сопла до поверхности заготовок, угол распыла, скорость струи, расположение опорных и поддерживающих роликов и их конструкция и т.д.

Учитывая изложенные обстоятельства, а также сложность решения подобных задач, особую ценность и первостепенную роль при освоении нового марочного сортамента и совершенствовании существующих режимов непрерывной разливки стали приобретают результаты экспериментальных исследований, выполненные на действующем оборудовании.

Ниже приведены результаты экспериментального изучения температурного поля при разливке непрерывнолитых заготовок сечением 250×300 мм из стали ШХ15СГ в условиях МНЛЗ-3 РУП «Белорусский металлургический завод», впервые выполненные сотрудниками НИЛ «Теория и техника металлургических процессов» (ранее отраслевая лаборатория «Проблемы металлургического производства») БНТУ совместно со специалистами завода в период 1998–2000 гг.

При термометрировании заготовки использована методика, разработанная и неоднократно апробированная специалистами НИЛ ТТМП при проведении промышленных экспериментов при разливке мелкосортных (сечением 125×125 мм) и крупносортных (сечением 250×300 мм, 300×400 мм) заготовок из различных марок стали (углеродистых, кордовых, легированных, трубных) в условиях МНЛЗ-1, 2, 3 РУП «БМЗ» [3, 4]. Для измерения температур в нескольких точках поперечного сечения заготовки использовали гибкий термоблок с вольфрам-ренийевыми термопарами диаметром 0,5 мм. Скорость разливки при проведении эксперимента по измерению температур в слитке сечением 250×300 мм шарикоподшипниковой стали (ШХ15СГ) на МНЛЗ-3 составляла 0,5 м/мин. В процессе вытягивания слитков проходит кристаллизатор длиной 0,8 м и зону вторичного охлаждения общей длиной 2,93 м. В первой секции ЗВО протяженностью 0,47 м расположено три ряда (12 штук) плоскофакельных форсунок, ориентированных на грани слитка. Вторая секция включает также три ряда (12 штук) форсунок типа ТГ, длина секции составляет 0,95 м. В третью секцию протяженностью 1,51 м входят пять рядов форсунок ТГ (20 штук). Расход воды по секциям (зонам) при проведении эксперимента составлял: 1 зона – 15,5; 2 зона – 12,2; 3 зона – 7,9 л/мин. Результаты изменения температур в различных точках поперечного сечения заготовки приведены на рисунке 1. Была зафиксирована температура в трех точках: вблизи центра слитка (точка 1), около угла, ближе к широкой грани (точка 3) и в точке 2, находящейся в промежуточной зоне между поверхностью и центром. Точка 1 показывает снятие теплоты перегрева стали на уровне 3–3,5 м металлургической длины, что соответствует прохождению слитком третьей секции ЗВО. После достижения в точке 1 температуры солидуса скорость охлаждения

увеличивается и составляет в среднем 20 град/мин до выхода из тянущего устройства ТУ-2, затем уменьшается и составляет 9–10 град/мин. Для точки 3 характерна практически одинаковая скорость охлаждения до тянущего устройства ТУ-1 (20–22 град/мин), затем она снижается, что объясняется отсутствием принудительного охлаждения поверхности заготовки. Термопара 2 вышла из строя перед ТУ-2, однако и в этом случае характерна практически одинаковая скорость охлаждения металла.

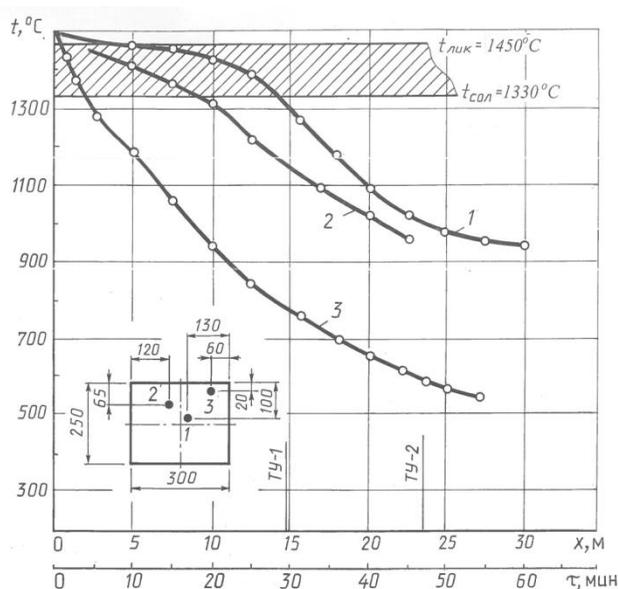


Рисунок 1 – Изменение температур в различных точках сечения заготовки 250×300 мм, сталь ШХ15СГ

При проведении эксперимента предполагался ввод гибкого термоблока таким образом, чтобы одна из термопар оказалась в центральной точке заготовки. Из расположения термопар, зафиксированных после разрезки слитка, очевидно, что термопара 1 находится на некотором удалении от центра заготовки, что не позволило в конкретном случае определить момент достижения центром температуры солидуса (нижней границы двухфазной зоны).

Следует также заметить, что имеющаяся в технической литературе информация о температурах ликвидуса и особенно солидуса для шарикоподшипниковой стали достаточно разноречива.

Согласно работе [5], наиболее высокой точностью при расчете температуры ликвидус углеродистой стали с повышенным содержанием хрома, марганца и других элементов обладают методики [6] и [7]. Расчет, выполненный по указанным методикам, привел к следующим значениям:  $t_{лик} = 1385,89$  °С по методике [6] и  $t_{лик} = 1432,42$  °С по методике [7]. Согласно данным работ [8, 9] температура ликвидус составляет 1450 °С. Учитывая, что температурный диапазон кристаллизации шарикоподшипниковой стали по разным данным составляет 120–200 °С, рассчитанные по методикам [6, 7] значения  $t_{лик}$  имеют достаточно большую погрешность. Расчет температуры с использованием методики [5] дает более точные результаты, а именно для рассматриваемой марки стали  $t_{лик}$  составляет 1451,7 °С.

При определении температуры солидуса шарикоподшипниковых марок стали, например, в работе [8] для стали ШХ15 это значение принимается 1230 °С, авторы работы [9] используют в расчетах значение  $t_{сол} = 1340$  °С, согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [10], температура солидуса стали ШХ15СГ составляет 1317 °С, стали ШХ15 – 1331 °С. Расчет по методике, приведенной в работе [5], в соответствии с которой влияние различных элементов на температуру кристаллизации определяют по диаграммам состояния для каждого элемента, дает значение температуры солидуса 1370 °С. Следует отметить, что испытания, выполненные в лаборатории Ченстоховского политехнического института (Польша), показали, что при температуре 1350 °С образец стали ШХ15СГ, произведенный на РУП «БМЗ», находился в двухфазном состоянии. На основании изложенного полагаем, что наиболее близким к действительности следует считать значение температуры солидуса для стали ШХ15СГ 1320–1330 °С. Вместе с тем, при обогащении расплава ликвирующими примесями это значение может изменяться и для более точного определения температуры солидуса необходимо выполнять перерасчет.

Таким образом, впервые получены экспериментальные результаты термометрирования непрерывнолитой заготовки из шарикоподшипниковой стали (ШХ15СГ) в условиях действующей МНЛЗ-3

РУП «БМЗ», которые имеют первостепенное значение для теории и технологии непрерывной разливки стали. Это позволит осуществить теоретические исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывнолитых слитков из специальных марок стали, базирующиеся на математическом моделировании и решении поставленной задачи численными методами, параметрической идентификации модели и разработке рекомендаций по рациональным режимам разливки, обеспечивающих требуемое качество заготовки.

### Список литературы

- 1. Затвердевание** стального слитка в изложнице: Методы исследования режимов затвердевания и охлаждения. Справочник / В.И. Тимошпольский [и др.]. – Минск: Выш. шк., 2003. – 223 с.
- 2. Комплексная** технология при производстве шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ в условиях РУП «Белорусский металлургический завод» / Тимошпольский [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2001. – № 4. – С. 97–102.
- 3. Стальной слиток.** Затвердевание и охлаждение / Ю.А. Самойлович [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2000. – Т. 2. – 583 с.
- 4. Тимошпольский, В.И.** Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня / В.И. Тимошпольский. – Минск: Наука и техника, 1995. – 256 с.
- 5. Расчет** температуры ликвидус стали / А.Н. Смирнов [и др.] // *Сталь*. – 1996. – № 3. – С. 15–19.
- 6. Hirai, M.** Tetsu to Hagane / M. Hirai, K. Kanamru, H. Mori. – 1969. – V. 52. – P. 85.
- 7. Andrews, K.W.** Solidification ranges of steel / K.W. Andrews // A note submitted to the alloy phase diagram date Committee of the Metal Society. – 1981. – P. 1–8.
- 8. Totefaute, W.** Archive f.d. Eisenhüttenwesen / W. Totefaute, A. Spon Heuer, H. Bennek. – 1935 (May). – H. 11.
- 9. Хасин, Г.А.** Теплофизические и электрические характеристики ряда легированных сталей и сплавов при высоких температурах / Г.А. Хасин, Л.В. Дьяконова // *Проблемы стального слитка: сб. науч. тр.* – 1969. – Т. 4. – С. 71–85.

**10. Самойлович, Ю.А.** Затвердевание стальных слитков квадратного сечения // *Металлургическая теплотехника*: Тр. ВНИИМТ. – Свердловск: Среднеурал. кн. изд-во, 1965. – № 12. – С. 96–113.

*УДК 621.774*

**Н.И. ИВАНИЦКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Н.В. СОРОКИН** (БНТУ)

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПРОШИВНЫХ ОПРАВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ОАО «ЗАВОД ЛЕГМАШ»**

Проблема производства стальных бесшовных горячекатанных труб весьма актуальна, так как они находят весьма широкое применение в качестве конструкционных труб в строительстве, машиностроении, нефтяной промышленности и др. В настоящее время трубоброкатное производство Республики Беларусь ставит своей задачей повысить стойкость прошивных оправок отечественного производства не ниже 200 проходов. Эксплуатационная стойкость прошивных оправок в значительной мере определяет качество внутренней поверхности полых заготовок, их геометрические параметры, производительность процесса прошивки и, в конечном итоге, себестоимость выпускаемой продукции.

Прошивные оправки в процессе эксплуатации работают в тяжелых условиях. Одним из наиболее опасных видов изнашивания прошивных оправок является адгезионное изнашивание [1]. При высоких скоростях скольжения и давления появляются чистые от пленок металлические поверхности и между ними образуются адгезионные связи. В результате на одной поверхности трения образуются углубления, а на другой – вырванные частицы, которые вызывают интенсивное разрушение трущихся поверхностей. При высоких температурах происходит сваривание, что является причиной отказа в работе прошивных оправок. Одним из путей предупреждения схватывания металлических поверхностей является снижение прочности адгезионной связи [2]. Достаточно эффективно это может достигаться разделением поверхностей трения жидким или