

31. *Постольник Ю.С.* Метод эквивалентных источников в задачах нестационарной теплопроводности. В кн.: Теплообмен и гидродинамика. Киев: Наук. думка, 1977. С. 161 – 167.

32. *Постольник Ю.С.* Обобщение и дальнейшее развитие методов теплового пограничного слоя // Изв. вузов. Черная металлургия. 1982. № 2. С. 137 – 141.

33. *Постольник Ю.С.* Приближенные методы исследований в термомеханике. Киев; Донецк: Вища шк., 1984. 158 с.

34. Расчет нагрева термомассивных тел в условиях теоретического противотока / В.И. Тимошпольский, Ю.С. Постольник, С.М. Козлов и др. // Литье и металлургия. 2001. № 1. С. 63 – 64.

35. *Постольник Ю.С., Огурцов А.П., Зинченко Ю.М.* Термонапряженное состояние длинного цилиндра в условиях противоточного радиационного нагрева // Межд. сб. науч. тр.: Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк: ДНТУ. 2003. С. 137 – 138.

УДК 621.7456

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),
А.Б. СТЕБЛОВ, д-р техн. наук,
Д.Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
В.А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук (РУП «БМЗ»)

НЕПРЕРЫВНАЯ РАЗЛИВКА ПОДШИПНИКОВЫХ СТАЛЕЙ

Подшипниковые стали разливаются преимущественно в слитки. Способ непрерывной разливки применяется уже около тридцати лет, однако в зависимости от типа разливочной машины используются различные технические решения и технологии, направленные на обеспечение требуемого качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок.

К настоящему времени накоплен большой опыт непрерывной разливки подшипниковых сталей, который можно систематизировать по технологическим операциям на МНЛЗ.

Промежуточный ковш. В последнее время прослеживается тенденция увеличения вместимости промежуточных ковшей за счет высоты их рабочей полости до 800...1000 мм и снабжения их Т-образной приемной камерой. Масса металла в промежуточном ковше составляет более 30 т. В них устанавливаются также ловушки типа «Турбостоп» [1], перегородки с отверстиями и фильтры [2] для снижения неметаллических включений. Для уменьшения турбулентности потока металла, поступающего в канал стакана-дозатора, устранения воронкообразного движения металла над входным каналом на днище промежуточного ковша в непосредственной близости от стакана-дозатора устанавливаются «гасители» – огнеупорные кирпичи, поставленные на ребро и вмонтированные в днище [3]. В промежуточном ковше в качестве рабочего огнеупорного слоя приме-

няется торкрет-масса на основе магнезита. Перегородки в промежуточном ковше выполняются из высокоглиноземистого кирпича [2].

Стабилизация уровня металла. Известно, что загрязненность заготовок шлаковыми включениями в «синей» пробе связана в основном с нарушением постоянного положения уровня расплава в кристаллизаторе. При введении металла в кристаллизатор через глухонные погружные стаканы с четырьмя боковыми отверстиями напротив углов кристаллизатора содержание неметаллических включений при испытании на «синюю» пробу снижается в 2 раза. Продувка металла аргоном позволяет стабилизировать разливку и повысить ее серийность.

К 2000 г. специалисты АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» усовершенствовали технологию непрерывной разливки подшипниковых сталей (ШХ15, ШХ15СГ, ШХ4) [4]. При серийной разливке загрязненность крупными неметаллическими включениями (100...500 мкм) значительно снижена. При этом усовершенствован стопорный механизм на шиберные затворы для увеличения количества плавов в серии с 4 до 10. Конструкция автоматического поддержания уровня расплава в кристаллизаторе также изменена.

Разработаны новые конструкции шиберного затвора, решена задача подачи аргона в стакан-дозатор. Аргон поступает в стакан-дозатор, состоящий из двух частей. Между ними закрепляется пористое кольцо, через которое поступает газ (импульсная подача в течение 1 с или постоянная – без импульсов). Обоснована необходимость снижения диаметра разливочного стакана с 60 до 40 мм.

При переходе на шиберные затворы решена проблема автоматического запуска ручья, связанного с нерегламентированным поступлением первых порций металла и затвердеванием его в разливочном стакане. Созданы запускные устройства, представляющие собой воронки, установленные на специальной обматке на стакан-дозатор. Удалось полностью исключить применение кислорода при запуске.

Газы в стали. Содержание кислорода в подшипниковых сталях регламентировано: не более 0,002%, или 20 ppm. Оно обуславливает наличие оксидов в стали. В работе [5] установлено, что содержание кислорода служит показателем чистоты подшипниковой стали, но не показателем ее качества, так как разрушение подшипников происходит прежде всего из-за крупных включений. Быстрое разрушение вызывают крупные включения размером более 50...100 мкм преимущественно экзогенного происхождения (шлак, футеровка). Эндогенные включения намного мельче и проявляются через усталостную долговечность материала [6].

Долговечность обратно пропорциональна объемной доле неметаллических включений. Фирмой «Apta Steel» (Япония) разработана технология отливки из подшипниковой стали на МНЛЗ заготовок сечением 160×160 мм [7]. Вторичное окисление полностью устранено благодаря использованию газового уплотнения. Достигнутое содержания кислорода в конечном продукте – около 7...10 ppm.

В публикациях авторов [8 – 10], описывающих сквозную схему производства литых заготовок подшипниковой стали, указывается на необходимость полной герметизации тракта жидкой стали от стальной ванны до кристаллизатора.

В работе ЦНИИчермета [3] описан новый принцип защиты стыка стакана-коллектора шибера затвора стальной ванны и приемной воронки погружной трубы. По сравнению со всеми другими способами, применяемыми в отечественной практике, такой прием наиболее эффективно влияет на качество макроструктуры. Прирост азота – косвенного показателя интенсивности вторичного окисления – на разливке был в 2 – 4 раза ниже, чем при других способах защиты, и не превышал 5...8 ppm. Результат достигнут за счет установки на указанном стыке кольца специальной конструкции и подачи в него аргона, создающего сплошной газовый экран. Защита металла от контакта с окружающей атмосферой на стыке выпускного стакана промежуточного ковша (стакана-дозатора) и погружного стакана помимо подачи аргона в зону стыка (через стопор или шибер) может быть усилена за счет прокладок из огнеупорного фетра, устанавливаемых заранее на седло (воронку) погружного стакана. Технология, внедренная на ОАО «Волжский трубный завод», показала высокую эффективность защиты стали. В промежуточном ковше применены стаканы-дозаторы с шаровой поверхностью.

К настоящему времени на ОАО «ОЭМК» накоплен значительный опыт производства непрерывнолитых заготовок сечением 300×360 мм из подшипниковой стали. Общее содержание кислорода при серийной разливке – не более 20 ppm. Установлено, что качество макроструктуры заготовок ухудшается с уменьшением сечения заготовки. Процесс разливки заготовок малых сечений идет с более высокой скоростью. В этом случае неметаллические включения в кристаллизаторе практически не успевают всплыть к зеркалу металла. Поэтому помимо очищения расплава в процессе выплавки и исключения вторичного окисления необходимо обеспечить возможность рафинирования расплава в промежуточном ковше. Отбраковка труб из непрерывнолитой подшипниковой стали производства ОЭМК по пелам на наружной поверхности на трубных заводах снизилась в 2,5 – 3,4 раза, а по пелам на внутренней поверхности – в 1,2 – 1,3 раза по сравнению с аналогичными показателями для труб из металла традиционной слиточной сифонной разливки.

Установлено, что содержание водорода в жидкой стали не должно превышать 2 ppm. Вакуумная обработка расплава в течение 10...15 мин аргоном (5 л/мин на тонну стали) позволила снизить содержание водорода до 1,2...1,6 ppm. Увеличение продолжительности продувки или расхода аргона не оказывает заметного влияния на конечное содержание водорода. Отмечено, что в процессе серийной разливки стали на МНЛЗ содержание водорода в течение 10 мин увеличивается до 2,6 ... 3,3 ppm. Основные источники роста содержания водорода – футеровка промежуточного ковша (увеличение максимального содержания водорода составляет пример-

но 0,8 ppm для первой плавки в серии) и защитная огнеупорная труба (среднее увеличение максимального содержания водорода – 0,7 ppm).

Шлакообразующие смеси. При высокоскоростной непрерывной разливке подшипниковой стали на сортовых МНЛЗ ассимиляция всплывающих в промежуточном ковше неметаллических включений зависит от качества защитной шлакообразующей смеси (ШОС). Она должна исключить тепловые потери с зеркала расплава, ассимилировать всплывшие включения и не увлекаться потоками металла в кристаллизатор.

Хорошие результаты получены в работе [11]. Защита зеркала расплава в промежуточном ковше осуществляется порошкообразной ШОС на основе $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (мусковит (слюда) 45%, бентонит 40%, коксовая пыль 15%). Расход ШОС – 150...200 кг на серию плавов. Потери температуры за время разливки плавки составляют ± 5 °С. Ассимилирующая способность ШОС к крупным включениям (по «синей» пробе) была примерно в 2 раза выше, чем ШОС на основе $\text{CaO} - \text{SiO}_2$. Для защиты металла в кристаллизаторе применяется четырехкомпонентная ШОС (известь, бентонит, криолит, графит).

Улучшению удаления из расплава неметаллических включений эндогенного и экзогенного происхождения, обеспечению более равномерного распределения температуры по объему металла и по ручьям способствует ШОС оптимального состава. Эффект усиливается на промежуточном ковше увеличенной вместимости с высоким рабочим уровнем металла и относительно узким рабочим пространством в районе ручьев в случае применения в приемной камере устройства «Турбостоп» и «гасителей».

Технология разливки. Существенное улучшение качества макроструктуры непрерывнолитого слитка достигается при разливке с минимальным перегревом стали. Это возможно при снижении тепловых потерь за счет использования крышки на сталеразливочном ковше, специального защитного шлака, подогрева стали на участке ковш – печь за счет создания теплового ядра в верхней части ковша.

В работе [12] показано, что при установке системы плазменного подогрева в промежуточном ковше среднюю температуру перегрева расплава снизили на 10 °С. Кроме того, сделан вывод о значительно более высокой экономической эффективности подогрева расплава только последних 15...20 т стали с пониженной температурой, что позволяет успешно разливать холодные плавки. В процессе серийной разливки плавов уровень расплава в промежуточном ковше поддерживали в пределах 800 мм, а температуру – 1485...1495 °С. Рабочая скорость разливки 0,55...0,60 м/мин. Струя металла между ковшами герметизируется огнеупорной трубой и аргоном. При плазменном подогреве в промежуточном ковше необходимо использовать аргон, чтобы исключить прирост азота в металле [13]. Разработанная технология производства подшипниковых сталей снизила удельную загрязненность проката крупными включениями от 1 до 1,5 мм с 12,5 до 2,5 мм/дм².

Электромагнитное перемешивание. Формирование осевой рыхлости и ликвации во многом определяются особенностями кристаллизации непрерывнолитого слитка. Здесь главными являются большая глубина жидкой лунки, величина конвективных потоков в ней, количество структурных дендритных зон, которые определяют возникновение «мостов» в результате смыкания выступов от противоположенных фронтов.

Для снижения развития осевой ликвации и рыхлости наряду с минимальным перегревом над ликвидусом температуры разливаемой стали важное значение имеет электромагнитное перемешивание (ЭМП) затвердевающего слитка в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

Наиболее эффективно на качество сортовых заготовок воздействуют устройства ЭМП, размещенные в кристаллизаторе. Качество заготовок зависит от интенсивности перемешивания. Показателем интенсивности ЭМП в мировой практике принято считать достигаемое максимальное значение линейной скорости жидкого металла в потоке, которую должен развивать статор ЭМП ($v_{\max} = 0,3 - 1,0$ м/с). При $v_{\max} < 0,3$ м/с эффективность перемешивания уменьшается. При $v_{\max} > 1$ м/с возникает отрицательная ликвация. Интенсивное движение потока металла вдоль области затвердевания быстрее (в 1,8 раза) снижает перегрев [14]. При движении жидкого расплава в кристаллизаторе обламываются ветки растущих дендритов. Они становятся дополнительными центрами кристаллизации и расширяют зону мелких равноосных кристаллов.

Для предотвращения затягивания защитного шлака интенсивность перемешивания металла в верхней части кристаллизатора должна быть снижена. Более полного воздействия на осевую рыхлость и центральную пористость сортовых заготовок можно достичь, если расположить устройство для ЭМП в зоне вторичного охлаждения и в конце зоны затвердевания слитка [15].

Согласно сообщению [16], вертикальная МНЛЗ фирмы «Daido Steel» (Япония), оборудованная электромагнитными перемешивателями в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (со скоростью перемешивания металла 0,3 м/с), с подогревом металла в промежуточном ковше, способна отливать из подшипниковых сталей заготовки диаметром 350 мм. Для этого МНЛЗ оборудовали устройством «мягкого» обжатия, состоящим из двух пар приводных роликов диаметром 400 мм.

Конструкция кристаллизатора. В последние годы производство подшипников из непрерывнолитых сортовых заготовок (180×180 мм) расширяется. Такие работы ведутся на сортовых МНЛЗ ряда стран – Японии, Германии, Китая, Украины и др. [7, 17 – 19]. Сортные заготовки, как правило, отливают на многоручьевых МНЛЗ (до 6 ручьев) со скоростями до 3 м/мин. Высокие скорости вытягивания сортовых заготовок достигаются за счет применения гильзовых кристаллизаторов специальной конструкции. Рабочий профиль гильз по высоте выполнен в виде системы убывания обратных конусов («Конвекс») или в виде кривой, близкой к

параболе в продольном направлении, и специального профиля в поперечном сечении [20, 21]. Использование кристаллизаторов типа Fast Cast, Diamond, BM-Синус и других при литье сортовых заготовок обеспечивает надежное увеличение скорости вытягивания по сравнению с разливкой в одноконусные кристаллизаторы на 25...35%. Более плотный теплоконтакт с оболочкой слитка по всей длине кристаллизатора требует увеличения интенсивности и равномерности охлаждения стенок кристаллизатора. В таких кристаллизаторах зазор между гильзой и корпусом не превышает 3...4 мм, скорость потока воды в зазоре – до 15 м/с, а удельный расход на охлаждение кристаллизатора квадратного сечения – не менее 35...40 л/мин на 1 см периметра.

Вторичное охлаждение и «мягкое» обжатие. Известно достаточное количество исследований, показывающих преимущество «мягкого» водовоздушного охлаждения во вторичной зоне по сравнению с водяным форсуночным охлаждением. В работе [8] приведены результаты использования технологии охлаждения металла во вторичной зоне за счет применения устройства кессонного теплосъема. При его использовании ликвация значительно снижается. По мнению авторов, есть возможность практически полностью устранить ликвацию. Однако при этом возможно образование термических трещин.

При отливке сортовых заготовок трудно осуществить механическое «мягкое» обжатие (ММО) твердожидкой зоны слитков. Это в значительной степени объясняется разницей температур по углам и в середине заготовок, так как только малая часть прикладываемого к заготовке обжатия передается в ее центр.

Установлено, что сегрегация углерода может быть значительно снижена за счет «мягкого» обжатия, которое позволяет подавить образование мостов дендритов в осевой зоне. Минимальная сегрегация получена при доле твердой фазы в момент «мягкого» обжатия в заготовке, равной 40%. Повышенная степень «мягкого» обжатия вызывает появление внутренних трещин. Оптимальная степень обжатия составляет 1,6%. Для предотвращения образования трещин обжатие заготовок необходимо производить в оптимальной точке. Поэтому первым шагом при проектировании ММО является определение начальной точки приложения обжатия, скорости разливки и условий вторичного охлаждения.

В последние годы фирма «Concast AG» (Швейцария) провела успешную серию промышленных опытов по ММО сортовых заготовок (кв. 150...160 мм) [19]. Эксперименты, выполненные фирмой «Concast AG», показали, что эффективность обжатия твердожидкой части заготовок возрастает при использовании поперечного сечения с двумя выпуклыми поверхностями заготовок на их верхней и нижней сторонах. Преимуществами такого профиля сечения заготовок является и то, что оно хорошо подходит для высокоскоростных гильзовых кристаллизаторов «Конвекс». В этом случае также требуются незначительные изменения процесса по сравнению с традиционно «квадратной» заготовкой (кристал-

лизатор, направляющие ролики и вся система вторичного охлаждения остаются без изменений). Эта схема была успешно опробована. Рекомендованная выпуклость заготовок – 8 мм (по 4 мм на сторону).

Первая промышленная УНРС фирмы «Concast AG», оборудованная ММО и предназначенная для отливки сортовых заготовок, введена в эксплуатацию в 2002 г. на заводе «Weiman Special Steels» в Китае. Сообщается, что реализация процесса ММО требует точного соблюдения параметров разлива для обеспечения стабильной повторяемости в ежедневной работе. Из этого следует, что процесс ММО должен быть интегрирован в крупномасштабную систему регулирования (уровень 2). Этот уровень автоматизации и программное обеспечение должны в режиме реального времени управлять процессом затвердевания слитка и позиционированием обжигающих валков в соответствии с текущим состоянием жидкой сердцевины.

От жесткости роликовой системы и точности ее настройки, конструкции роликов, их количества в значительной степени зависит пористость осевой зоны и сегрегация углерода [22]. Это положение особенно важно для сортовых УНРС конструкции фирмы «Расор», где количество поддерживающих роликов минимально. В этом случае важно обеспечить равномерное вторичное охлаждение, исключающее разогрев поверхности слитков до их полного затвердевания. Важно также исключить интенсивное охлаждение на углах заготовки [17].

Исследования по использованию ММО проводятся на многих предприятиях. Фирмой «Корад» (г. Москва) «мягкое» обжатие удачно опробовано на слябовой УНРС ОАО «Северсталь». Планируется разработка и внедрение в 2005 г. базового образца «мягкого» обжатия фирмой «Корад» на РУП «БМЗ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Фукс Е., Цехнер Р. Технология «Турбостоп» – оптимизация течения в промежуточном ковше для улучшения качества стали и увеличения производительности // Тр. VI конгресса сталеплавыльщиков. Череповец, 2000. 17 – 19 окт. М.: ОАО «Черметинформация», 2001. С. 445 – 458.

2. Либерман А.Л. Повышение качества непрерывнолитых заготовок при низком уровне расплава в промежуточном ковше // *Металлург*. 1995. № 9. С. 31 – 32.

3. Либерман А.Л. Снижение газонасыщенности непрерывнолитого металла // *Металлург*. 1995. № 5. С. 28 – 29.

4. Совершенствование технологии производства непрерывнолитой заготовки большого сечения / С.П. Бокарев, В.А. Кондратюк, А.И. Зубков и др. // *Сталь*. 2000. № 7. С. 16 – 18.

5. Листопад В.И., Николаев Н.К., Клименкова О.Л. Улучшение качества сортового проката из непрерывнолитой подшипниковой стали и повышение долговечности подшипников // *Сталь*. 1992. № 1. С. 29 – 31.

6. Молотилев Б.В., Борисов В.Т., Поздняков В.А. Влияние структурных параметров стали на долговечность подшипников качения // *Сталь*. 2002. № 12. С. 59 – 61.

7. *Nagayama H., Tsuge T.* Production of bearing steel billet continuous casting // *Zaryo to Prosessu – Current advances in Materials and processes.* 1998. P. 919.
8. Влияние интенсивности водяного охлаждения при непрерывной разливке стали ШХ15 на качество слитков сечением 82×82 мм / Г.Ф. Чистяков, Г.П. Завалин, В.В. Соболев, А.И. Федченко // *Сталь.* 1987. № 9. С. 32 – 33.
9. *Endo M., Doi K., Matsushima Y.* Production of high purity bearing steels in the BOF– IF CE route // *Steel Times.* 2000. № 10. P. 374 – 376.
10. *Синельников В.А.* Создание технологических основ производства бездефектной непрерывнолитой заготовки малых сечений стали ШХ15 для изготовления тел качения // *Тр. VII конгресса сталеплавыльщиков.* М.: ОАО «Черметинформация», 2003. С. 340 – 345.
11. *Ткачев Т.Н., Лейтес А.В., Кан Ю.Е.* Повышение стойкости футеровки промежуточных ковшей и снижение загрязненности непрерывнолитой заготовки // *Сталь.* 1996. № 10. С. 16 – 17.
12. *Trontman S., Comacho D.* Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska // *Iron and Steel Engineer.* 1995. V. 73. № 11. P. 39 – 44.
13. Энергосберегающая технология регулирования температуры жидкой стали / Я.Л. Кац, В.П. Кириленко, А.Г. Шалимов и др. // *Сталь.* 1997. № 9. С. 24 – 29.
14. *Вюннерберг К.* Возможности и пределы теплопередачи в кристаллизаторах МНЛЗ // *Черные металлы.* 2000 № 12. С. 35 – 41.
15. *Эйдем М., Хакль Х., Коллберг С.* // *Междунар. конф. «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке».* 1994. Т. 3. С. 231 – 238.
16. *Hagakawa S., Shinkai M., Kashima T.* Improvement of Center of Continuous Cast Round Bloom with Reductio // 3-rd European Conference on Continuous Casting. Madrid, Spain. 1998. P. 925 – 937.
17. Освоение производства непрерывнолитых заготовок на высокоскоростной 6-ручьевой МНЛЗ / Х.С. Раза, Г.И. Касьян, В.Г. Осипов и др. // *Металл и литье Украины.* 2001. № 5 – 6. С. 19 – 21.
18. *Juan B., Wogler R.* The conversion of a caster at Acindar for quality steel and mini slab casting // *Steel Times International.* 1999. V. 23. Issue 2. P. 18.
19. *Бирни С., Тергеми С.* Технология «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок // *Steel Times International.* 2003. № 11. С. 20 – 22.
20. *Хорбах У., Коккентидт Й., Юнг В.* Литье сортовых заготовок с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля // *МРТ.* 1998. С. 42 – 51.
21. Гильзовые кристаллизаторы для высокоскоростной разливки стали / В.Б. Ганкин, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов и др. // *Тр. VI конгресса сталеплавыльщиков.* Череповец. 2000. 17–19 окт. М.: ОАО «Черметинформация», 2001. С. 461 – 470.
22. *Молнар Й., Фюрхофер Х., Мервальд К.* Новые технологические решения для модернизации МНЛЗ // *Сталь.* 2001. № 1. С. 60 – 62.