



The modern state of technologies at steel casting in the field of quality increase is shown.

А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ»

УДК 669.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА

В мировом производстве черных металлов улучшение качества непрерывнолитых заготовок наряду с совершенствованием технологии выплавки и внепечной обработки достигается в результате использования расходуемых материалов требуемого качества. Кроме того, к обязательным технологическим процессам можно отнести надежную защиту жидкого металла при разливке от вторичных процессов окисления, использование кристаллизатора и механизма качания новых конструкций, применение физических методов воздействия на процесс формирования внутреннего строения слитка в виде электромагнитного поля и мягкого обжата в зоне затвердевания, автоматизации и оперативного контроля процесса разливки.

Рассмотрим более подробно основные технологические процессы и оборудование при разливке стали.

Кристаллизатор. Основным функциональным звеном, определяющим процесс в непрерывной разливке заготовок, является кристаллизатор, включающий в себя медную водоохлаждаемую гильзу, установленную в ее корпусе, который может совершать возвратно-поступательные движения с заданной частотой и амплитудой. Кристаллизатор имеет систему контроля (поддержания) уровня металла и систему подачи охлаждающей воды в зазор между внешней поверхностью гильзы и рубашкой в корпусе. Сбалансированность работы всех элементов конструкции кристаллизатора в совокупности с параметрами работы механизма его качания обеспечивают оптимальные условия для формирования литой заготовки. Важнейшим элементом, обеспечивающим эффективность работы кристаллизатора, является гильза, посредством которой происходит отвод тепла от затвердевающей заготовки к охлаждающей жидкости. В процессе

разливки стали температура внутренней поверхности гильзы достигает 180–190 °С. Для повышения эксплуатационной стойкости внутренняя поверхность гильзы имеет защитное покрытие толщиной 0,07–0,12 мм. Обеспечение устойчивого контакта поверхности заготовки с внутренней поверхностью гильзы является едва ли не важнейшей задачей для равномерного формирования твердой корочки и геометрической формы заготовки. В последние два десятилетия наибольшее распространение для МНЛЗ получила концепция так называемой «параболической» формы внутренней полости гильзы кристаллизатора, которая в максимальной степени учитывает усадку заготовки по мере ее движения вниз, что позволяет минимизировать величину воздушного зазора между заготовкой и стенками гильзы. Известно, что воздушный зазор имеет термическое сопротивление на порядок выше, чем термическое сопротивление стенки гильзы и может составлять 35–50% от общего термического сопротивления в системе отвода тепла от жидкой стали к охлаждающей воде. Соответственно увеличение воздушного зазора тормозит рост твердой корочки, а при неравномерном воздушном зазоре по граням и углам возможна деформация профиля заготовки. Именно поэтому ряд разработчиков и производителей гильз (например «Europa Metalli», «Abax») предпочитают иметь в нижней части гильзы повышенную конусность, которая как бы гарантирует контакт заготовки с поверхностью нижней части гильзы. Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации таких гильз, основной причиной их выхода из строя служит сравнительно быстрый износ в нижней части, который начинается с истирания защитного покрытия, а затем и непосредственно тела медной гильзы.

Для разливки круглой заготовки при выборе конструкции гильзы основное внимание уделяется ее верхней части. В ней при литье может возникнуть овальность заготовки из-за разнотолщинности, обусловленной разной величиной газового зазора, что связано с влиянием ряда тепловых и физических воздействий, которые изменяют равномерность теплоотвода от оболочки по периметру. На МНЛЗ-2 Волжского трубного завода в 2006 г. проведена реконструкция оборудования зоны кристаллизации для разливки круглых заготовок диаметром 156 мм, где в реконструированные кристаллизаторы фирмы «SMS Demag» были установлены гильзы для круглого сечения «ВНИИМЕТМАШ», что позволило достичь максимальной скорости разливки 3,5 м/мин, снизить брак с 4,5 до 0,18%, уменьшить овальность заготовки с 0,46 до 0,01% и исключить затраты на доработку заготовок перед отправкой заказчику. При реконструкции МНЛЗ на металлургическом заводе «ТМК-Решица» (Румыния) использовались гильзы кристаллизаторов для круглой заготовки сечением 177 мм, разработанные и изготовленные «ВНИИМЕТМАШ» и получены аналогичные результаты.

Основные поставщики гильз большого квадратного и круглого сечения: «EM Moulds s. r. l.», «KME Germany AG & Co. KG», «Рочес ЗАО», «ОллГрадо ООО», «Anssen Metallurgy Group Co LTD», «GPO Imprex LLP», «AGC Technologies GmbH», «ВНИИМЕТМАШ».

Электромагнитное перемешивание. Предотвращение образования или подавления развития кристаллизационных, усадочных и ликвационных дефектов возможно за счет создания управляемого принудительного движения жидкой фазы кристаллизующегося слитка, в частности, с помощью электромагнитных сил, которые возникают при воздействии магнитного поля с электрическим током. При применении в кристаллизаторе электромагнитного перемешивания существенно меняется соотношение структурных зон – зона столбчатых кристаллов уменьшается, а зона равноосных – увеличивается. Причем даже при высоком перегреве над точкой ликвидус зона равноосного зерна составляет не менее 40% от площади поперечного сечения слитка. В кристаллической структуре заготовок, отлитых с электромагнитным перемешиванием, присутствуют центральная пористость рассредоточенного характера в виде мелких пор, разбросанных по всему тепловому центру, и осевая ликвация в виде точек и пятен. При разливке высокоуглеродистых сталей при использовании электромагнитного переме-

шивания отмечается снижение количества и размеров мартенситных участков.

Вторичное охлаждение. Функциональная зона вторичного охлаждения является крайне важной с точки зрения качества заготовки. Это, в первую очередь, относится к предотвращению формирования различного рода термических внутренних напряжений в твердом каркасе заготовки. Вторичное охлаждение (режимы) может влиять на геометрическую форму заготовки, формирование трещин, осевую пористость и ликвацию. Высокая эффективность метода водовоздушного охлаждения объясняется тем, что благодаря высокой кинетической энергии с металлом одновременно контактирует большое количество распыленной воды. При одном и том же расходе воды площадь теплообмена между водой и заготовкой увеличивается: с одной стороны, вода мелко распылена и число капель очень велико, а с другой – эти капли равномерно распределяются по поверхности заготовки, так как факел имеет устойчивую форму конуса. Известно, что соотношение воздух-вода не является единственным и решающим фактором влияния на коэффициент теплоотдачи. Поэтому фирмой «Lecher GmbH» (Германия), являющейся одним из лидеров в производстве форсунок в мире, производились исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от давления воды в форсунке. Установлено, что в случае давления воды 400 кПа для форсунки 11/90–40–40 наблюдается прекращение поступления воздуха в смеситель форсунки (воздух вытесняется жидкостью) и с этого момента начинается уменьшение коэффициента теплоотдачи. Новым решением, которое получило развитие в последние годы, стала вертикальная прокладка труб квадратного сечения для воздушных и водяных подводов. Форсунки в таком исполнении с предусмотренным подсоединением крепятся на вертикальных пластинах. Обвязка с подводными трубами становится больше не нужна. Все распылители в этом случае находятся за пределами корпуса сегмента и подсоединены непосредственно к подводному коллектору. Такой метод подсоединения и крепления форсунок, испытанный фирмой «Lecher GmbH» (Германия), позволил гибко располагать их по ширине заготовки с тем, чтобы получить равномерность распределения охладителя и более эффективное охлаждение на различных зонах (установка форсунок в шахматном порядке). Фирмой «Lecher GmbH» рекомендуется конструкция «Split Pipe», позволяющая отделять переднюю часть с распылителем от корпуса форсунки, а также автоматически фиксировать направление струи. Это особенно важно для верхних сегментов, нахо-

дящихся вблизи кристаллизатора. Следующим преимуществом такой конструкции можно назвать то, что смеситель находится непосредственно на коллекторе и готовая водовоздушная смесь подается к соплу форсунки. Это позволяет компактно располагать и свободно охватывать любое межроликковое расстояние. В целом разработанное фирмой «Lecher GmbH» вторичное охлаждение заготовки распыленной водовоздушной дисперсией значительно улучшило теплопередачу, обеспечив при этом более интенсивный рост затвердевшей корки и более равномерное охлаждение заготовки, что позволило повысить скорость вытягивания заготовки на 15–20% и снизить количество брака заготовки по продольным и диагональным трещинам.

На машинах непрерывного литья Оскольского электрометаллургического комбината (ОАО «ОЭМК») разливают сталь широкого сортамента марок. Разливка высокоуглеродистой стали, в большей степени склонной к образованию дефектов, требует мягкого и равномерного вторичного охлаждения. Широко применяемая в настоящее время система водяного вторичного охлаждения блюмов не позволяет обеспечить плавное снижение температуры поверхности по длине заготовки и равномерное ее охлаждение по ширине из-за наличия участков локального переохлаждения. Обеспечить мягкое и равномерное вторичное охлаждение непрерывнолитых блюмов сечением 300×360 мм позволяет водовоздушная система вторичного охлаждения, разработанная «ВНИИМЕТМАШ». Испытана и внедрена на МНЛЗ № 1 ЭСПЦ-2. Система основана на принципе образования водовоздушной смеси в коллекторах в непосредственной близости от форсунок. Новая система вторичного охлаждения обеспечивает повышение качества трещиностойкой стали и снижения брака по раскатанной трещине с 0,02 до 0%, снижения доработки поверхности с 31 до 14%.

Мягкое обжатие. В высокоуглеродистых заэвтектоидных сталях макроликвация, получаемая при непрерывном литье блюмов, может быть настолько большой, что при дальнейшем переделе (производство катанки для металлокорда и предварительно напряженной арматуры) образуются мартенсит и выделения вторичного цементита, а это при волочении приводит к обрывам. В этих и других сталях подобного назначения даже электромагнитное перемешивание в кристаллизаторе и непосредственно под ним не всегда обеспечивают достаточное уменьшение осевой ликвации. Основной причиной образования макроликвации в непрерывнолитых заготовках являются подсасываю-

щие потоки, которые приводят к тому, что обогащенный расплав из междендритных пространств перемещается в область окончательного затвердевания и здесь концентрируется. Подсасывающие потоки могут появляться в гетерогенной области твердой/жидкой фазы, когда возникают пустоты при затвердевании. Образование раковин и макроликвация могут быть уменьшены, если сокращение объема, вызванное различием в плотности между твердой и жидкой фазами, будет при окончательном затвердевании компенсировано сжатием непрерывнолитого слитка (мягкое обжатие).

Кроме других возможностей, режим мягкого обжатия представляет собой особо эффективное средство устранения нежелательных сегрегационных эффектов и, следовательно, повышения качества непрерывнолитых заготовок. Это достигается за счет уменьшения толщины заготовки в зоне завершения кристаллизации в результате приложения внешних усилий до величины нормальной термической усадки, что позволяет выровнять резкий перепад объемов и предотвратить всасывание сегрегированного остаточного расплава. В то время как этот процесс уже используется при разливке слябов, геометрические параметры заготовок квадратного сечения, несмотря на положительные результаты испытаний, не позволили реализовать его на практике. Впервые данный режим обработки был успешно испытан и реализован на МНЛЗ SO компании Saarstahl AG.

Сталь Шталькорд для металлокорда фирма «Тиссен Шталь» выплавляет на металлургическом заводе Рурорт (г. Дуйсбург) [4]. В 1994 г. модернизирована МНЛЗ, отливающая блюмы сечением 265×385 мм. Модернизация предназначалась в первую очередь для повышения качества продукции, кроме того, увеличивалась производительность установки в результате повышения скорости литья от 0,85 до 1,0 м/мин. Были осуществлены мероприятия по замене кристаллизаторов с электромагнитным перемешиванием, изменен радиус машины на систему с несколькими точками разгиба с радиусами 11,95 и 18 м, заменены три тянущих устройства на пять под использование мягкого обжатия.

Совместно с фирмой «Маннесман Демаг» была разработана концепция проектирования и расчета «блока мягкого обжатия» (SR) для шестиручьевой МНЛЗ. Для определения влияния обжатия по толщине на структуру металла от клетки к клетке в некоторых опытах применяли следующий порядок: четыре отрезка блюма обжимали по толщине в различном числе клеток SR. Сначала применяли только клетку № 1, затем клетки № 1 + 2, клетки № 1 + 2 + 3 и, наконец, все четыре клетки. В каждом случае от

блюда отбирали пробу. По продольным серным отпечаткам высокоуглеродистой стали с 0,8% С при обжатии за проход 1 мм в клети № 1, 2 мм в клети № 2, 3 мм в клети № 3 и 2,5 мм в клети № 4 были сделаны следующие выводы о влиянии мягкого обжатия: при суммарном обжатии 3 мм, достигавшемся в клети № 2, уже отмечалось уменьшение ликвации по продольной оси затвердевания, однако V-образная ликвация была еще очень заметной; при суммарном обжатии 6 мм, достигавшемся в клети № 3, осевая ликвация уже была в значительной мере устранена, это относится и к V-образной ликвации; достигнутое в клети № 3 усреднение химического состава сердцевины блюма уже было настолько хорошим, что дальнейшее увеличение суммарного обжатия до 8,5 мм в клети № 4 не дало никакого дополнительного улучшения, обнаруживаемого по серным отпечаткам, однако микропористость уменьшилась.

Шестиручьевая МНЛЗ криволинейного типа компании «Saarstahl AG» (г. Фёльклинген) введена в эксплуатацию в апреле 2004 г. [5]. Заложенные в проекте параметры МНЛЗ (радиус кривизны 11 м, многоточечное выпрямление) позволяют удовлетворять жесткие требования в отношении качества поверхности и внутренней структуры заготовки. К особенностям агрегата относятся кристаллизаторы, обеспечивающие очень высокую скорость разливки (до 4 м/мин) в закрытом режиме, система резонансных колебаний с гидравлическим приводом и высокомоощные устройства для перемешивания расплава в кристаллизаторе и ручье, функционирующие в широком диапазоне частот, проводки для точного направления и высокоэффективного охлаждения заготовки с использованием высокого давления и двухкомпонентного агента. Размеры поперечного сечения заготовки составляют 150×150 мм при длине 8,0–15,5 м или 180×180 мм при длине 6–13 м. Основным элементом агрегата является узел мягкого обжатия в сегментном исполне-

нии. Вместо традиционных тянущих роликов агрегат располагает шестью имеющими гидравлический привод сегментами на ручей, которые обеспечивают точную установку зазора и распределение усилий в зоне завершения кристаллизации и, следовательно, целенаправленное влияние на формирование внутренней микроструктуры заготовки. Дополнительно имеется динамическая расчетная модель DSC (Dynamic Solidification Control – динамический контроль кристаллизации), с помощью которой определяются оптимальные параметры процессов вторичного охлаждения и мягкого обжатия.

Кроме других возможностей, режим мягкого обжатия представляет собой особо эффективное средство устранения нежелательных сегрегационных эффектов и, следовательно, повышения качества непрерывнолитых заготовок. Это достигается за счет уменьшения толщины заготовки в зоне завершения кристаллизации в результате приложения внешних усилий до величины нормальной термической усадки, что позволяет выровнять резкий перепад объемов и предотвратить всасывание сегрегированного остаточного расплава.

Возможности режима мягкого обжатия для уменьшения ликвации в средней части заготовки ограничены способностью к удлинению корочки на границе твердой и жидкой фаз. Так как повышенная нагрузка на корочку в зоне фронта кристаллизации приводит к образованию внутренних трещин, величина отдельных стадий деформации не должна превышать максимально допустимого значения. Соответствующее предельное значение можно установить экспериментально и путем расчета.

Сравнительные расчеты с использованием метода конечных элементов показали, что за счет оптимизации формы кристаллизатора с увеличенными размерами в верхней и нижней части можно усилить эффект режима мягкого обжатия, при этом уменьшается нагрузка на корочку заготовки и снижается риск возникновения внутренних трещин.

Литература

1. Ш а т о х и н С. Современные водовоздушные форсунок для зоны вторичного охлаждения МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10.
2. Е с а у л о в В. С., Н и к о л а е в В. А. Водовоздушное охлаждение непрерывнолитых заготовок на МНЛЗ // *Электрометаллургия*. 2004. № 10.
3. Я к у о л а М., Х а а п а л а М. Последние результаты динамического мягкого обжатия заготовок на слябовой установке непрерывной разливки // *Международная конференция линз*. Австрия, 2004 г.
4. З о в к а Э., А н д р е Б., Б е р т р а м Р. Модернизация установки непрерывного литья блюмов на заводе фирмы Тиссен Шталь (Дуйсбурге) // *Черные металлы*. 1995.
5. Т о м е Р., О с т х а й м е р В., Н е й Г. и др. Мягкое обжатие заготовок на машине непрерывного литья SO компании SAARSTAHL AG // *Черные металлы*. 2007.
6. Л и б е р м а н А. Л., Г е н к и н В. Я. Непрерывная разливка стали – современное состояние и перспективы развития // *Электрометаллургия*. 2002. № 1.