

УДК 669.147

А.Н. Смирнов /д.т.н./, В.Е. Ухин

Донецкий национальный технический университет (Донецк, Украина)

Е.Ю. Жибоедов

ОАО "Енакиевский металлургический завод" (Енакиево, Украина)

КОНСТРУКЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК НА СОРТОВЫХ МНЛЗ

Розглянуті відносно можливі шляхи розвитку конструкції гильзы кристаллизатора для високошвидкісних сортових МБЛЗ. Використовувані в практиці безперервного лиття сортової заготовки різного роду "параболічні" гильзы в цілому забезпечують підвищення швидкості лиття в 1,5...2,5 рази в порівнянні із традиційними двохконусними гильзами.

Рассмотрены относительно возможные пути развития конструкции гильзы кристаллизатора для высокоскоростных сортовых МНЛЗ. Используемые в практике непрерывного литья сортовой заготовки различного рода "параболические" гильзы в целом обеспечивают повышение скорости литья в 1,5...2,5 раза в сравнении с традиционными двухконусными гильзами.

Объем стали, разливаемой непосредственно на непрерывнолитую сортовую заготовку сечением от 100×100 мм до 200×200 мм постоянно возрастает, что, видимо, следует связывать с высоким спросом на такую заготовку на мировом рынке. Это объясняется серьезным техническим прогрессом, как в части развития технологии литья, так и в части некоторых конструктивных решений, определяющих производительность машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и качество сортовой заготовки [1].

Основным функциональным звеном, определяющим прогресс в непрерывной разливке стали на МНЛЗ, является кристаллизатор, включающий в себя медную водоохлаждаемую гильзу, установленную в корпусе, который имеет возможность совершать колебательное возвратно-поступательное движение с заданной частотой и амплитудой. Дополнительно кристаллизатор имеет систему контроля (поддержания) уровня металла и систему подачи охлаждающей воды в зазор между внешней поверхностью гильзы и корпусом кристаллизатора. Сбалансированность работы всех элементов конструкции кристаллизатора в совокупности с параметрами работы механизма качания обеспечивают оптимальные условия для формирования непрерывнолитой сортовой заготовки.

Важнейшим элементом, обеспечивающим эффективность работы кристаллизатора является гильза, посредством которой происходит отвод тепла от слитка к охлаждающей жидкости и не-

посредственно формируется геометрическая форма заготовки. При этом в ходе разливки стали внутренняя поверхность гильзы находится в постоянном динамическом контакте с твердой корочкой слитка, поскольку кристаллизатор совершает колебательное движение. В качестве материала для гильз кристаллизатора обычно используется либо первичная рафинированная медь, либо сплав меди с небольшим количеством серебра. 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, которое обеспечивает дополнительное сопротивление износу, обусловленное трением твердой корочки слитка о поверхность гильзы. Наиболее распространенным покрытием является хром. Кроме того, производители гильз используют различного рода трехслойные покрытия типа никель(+фосфор)-кобальт-хром, которые существенно повышают стойкость гильз, но удорожают их стоимость [2].

Обеспечение устойчивого контакта внешней поверхности непрерывнолитого слитка с внутренней поверхностью гильзы кристаллизатора является едва ли не важнейшей задачей с точки зрения равномерного формирования твердой корочки и геометрической формы слитка. На практике внутреннюю полость гильзы выполняют строго определенной геометрической формы, задавая определенную конусность от верха гиль-

зы к низу. В последние два десятилетия наибольшее распространение для сортовых МНЛЗ получила концепция так называемой "параболической" формы внутренней полости гильзы кристаллизатора, которая в максимальной степени учитывает усадку слитка по мере его продвижения вниз, что позволяет минимизировать величину воздушного зазора между слитком и стенками гильзы кристаллизатора (особенно в нижней ее части). Эта концепция в целом обеспечила рост скорости вытягивания заготовки в среднем в 1,5...2,5 раза в сравнении с одноконусной и двухконусной гильзами [3...5]. Видимо, дальнейший рост скорости вытягивания слитка может быть достигнут за счет оптимизации геометрической формы внутренней полости гильзы кристаллизатора применительно к конкретным условиям литья (маркам стали, требованиям к качеству поверхности и макроструктуры заготовки, условиям охлаждения гильзы водой и т.п.).

Между тем в практике непрерывной разлив-

ки не существует консолидированного понятия, описывающего, каким образом технически реализуется "параболическая" закономерность в форме внутренней полости гильзы кристаллизатора и какие определяющие параметры закладываются в расчет этой "параболической" зависимости. Поэтому в настоящей работе авторы предприняли попытку обобщения имеющихся теоретических и практических данных в части возможной оптимизации геометрической формы и условий эксплуатации гильз кристаллизатора для высокоскоростных сортовых МНЛЗ.

Как показал анализ литературных источников и рекламных проспектов ведущих мировых разработчиков и производителей гильз кристаллизаторов, основные типы конструкции гильз можно классифицировать по следующим признакам: характер изменения конусности по граням и углам гильзы в вертикальной плоскости, геометрическая форма граней гильзы в поперечном сечении, величина конусности в нижней части гильзы и т.п.

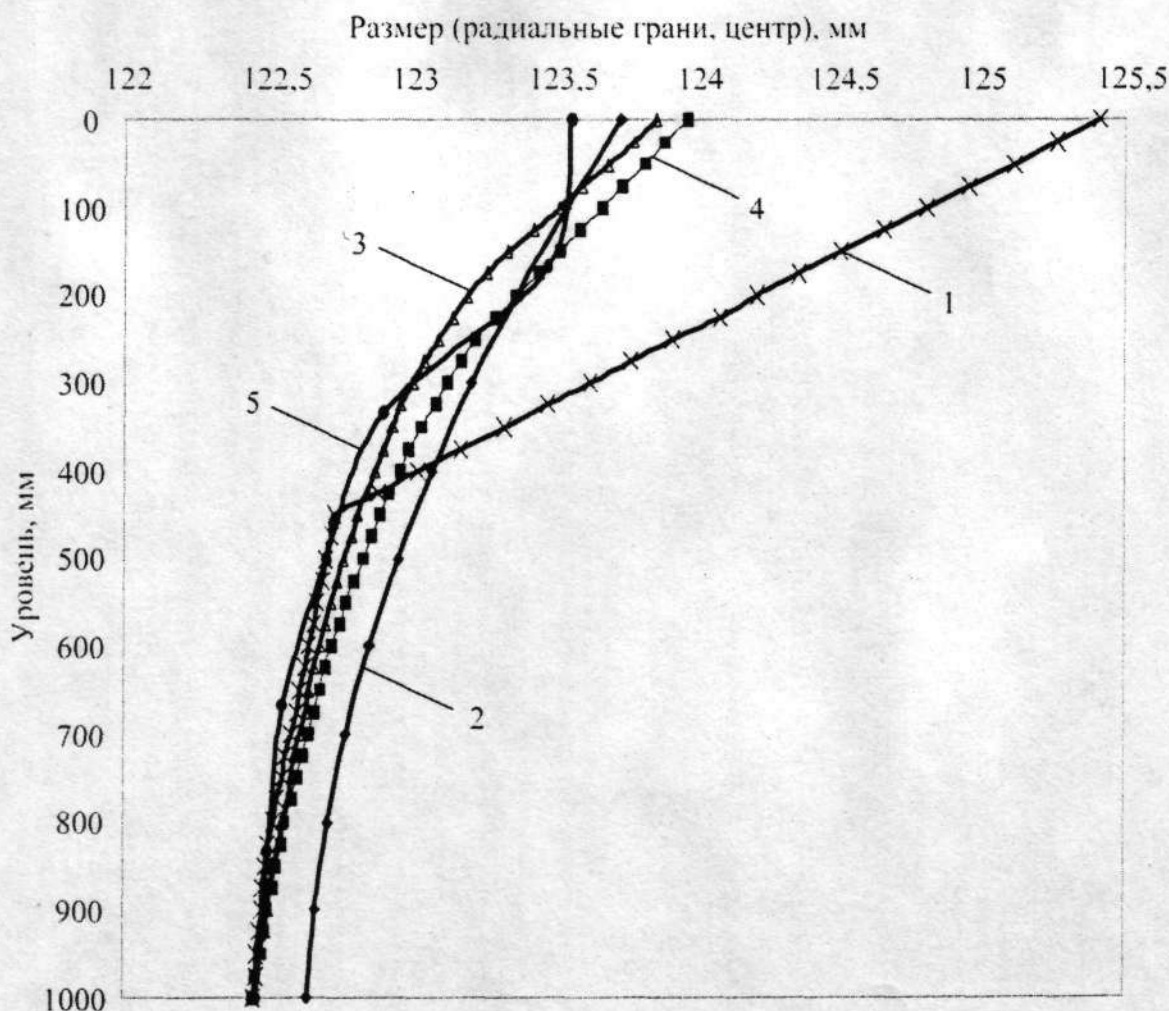


Рисунок 1 – Сравнение профилей гильз различных фирм-производителей:
 1 – "EM Moulds S.r.l."; 2 – "KME Germany AG"; 3 – "Shinko Metal Products Co., Ltd";
 4 – "Abax"; 5 – ОАО АХК "ВНИИметмаш"

На рисунке 1 приведено сравнение геометрических профилей гильз фирм-производителей "EM Moulds S.r.l." (Италия), "KME Germany AG" (Германия), "Shinko Metal Products Co., Ltd" (Япония), "Abax" (Китай-Германия) и ОАО АХК "ВНИИметмаш" (Россия), измеренных по середине граней для заготовки сечением 120×120 мм. Обобщая приведенные данные, следует отметить, что геометрический профиль гильзы кристаллизатора можно условно разбить на четыре участка:

I – участок, расположенный над уровнем металла в гильзе в процессе литья (его профиль определяется, главным образом, технологией изготовления гильзы и, как правило, имеет повышенную конусность);

II – участок, расположенный непосредственно под уровнем металла в гильзе и имеющий протяженность 150...250 мм (на этом участке происходит максимальный отвод тепла, а твердая корочка слитка только начинает формироваться и легко поддается деформации);

III – участок, расположенный под участком II и обеспечивающий наращивание твердой корочки слитка по мере его продвижения вниз (на этом участке собственно формируется геометрическая форма слитка);

IV – нижняя часть гильзы протяженностью 250...300 мм (на этом участке происходит образование установившихся воздушных зазоров между внутренней поверхностью гильзы и слитком как по углам, так и по граням, что оказывает существенное влияние на условия затвердевания слитка).

Почти во всех исследованных конструкциях гильз участки II и III имели закон изменения конусности, который был близок к расчетным значениям, учитывающим усадку слитка при затвердевании. Исключение составила трехконусная гильза конструкции ОАО АХК "ВНИИметмаш", имеющая выпуклые грани на I-м и II-м участках, которые плавно переходят в плоскость на III-м участке. Незначительные отличия в конфигурации этих участков у различных фирм-производителей следует объяснять некоторыми отличиями в выборе базовых исходных параметров для расчетов, с одной стороны, и ограничениями в точности измерений профиля гильзы, с другой. По мнению авторов, именно II-й и III-й участки могут рассматриваться как "параболические" (в отличие от прямолинейных двухконусных гильз традиционных конструкций). В зависимости от технологии изготовления гильз конусность на этих участках может меняться либо ступенчато, либо плавно (в соответствии с расчетной зависимостью).

Наибольшие различия в конфигурации гильзы в вертикальном сечении для различных производителей наблюдаются на IV-м участке. Это объясняется тем фактом, что именно на этом участке появляется высокая вероятность возникновения неравномерного воздушного зазора между слитком и гильзой кристаллизатора. 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 [6]. Соответственно появление воздушного зазора тормозит рост твердой корочки слитка, а при неравномерном воздушном зазоре по граням и углам (что представляется наиболее вероятным) может происходить деформация профиля слитка, что приводит к развитию дефекта типа "ромбичность". Недостаточное охлаждение слитка из-за появления воздушного зазора может также привести к подплавлению твердой корочки на выходе из кристаллизатора (в углах слитка) и, как следствие, к прорыву жидкого металла.

Видимо именно поэтому ряд разработчиков и производителей гильз (например, "EM Moulds S.r.l.", "Abax") предпочитают иметь в нижней части гильзы кристаллизатора повышенную конусность (превышающую расчетные значения, соответствующие параболе), которая как бы гарантирует контакт слитка с поверхностью нижней части гильзы. Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации таких гильз, основной причиной выхода их из строя является сравнительно быстрый износ в нижней части, который начинается с истирания защитного покрытия, а затем и непосредственно тела медной гильзы (рисунок 2). При этом величина износа может составлять 1,5...2,0 мм и существенно колеблется по периметру гильзы. Фактически такой износ нижней части гильзы создает благоприятные условия для формирования "ромбичности" слитка, поскольку износ гильзы в углах дает возможность деформироваться твердой корочке слитка и занять под действием внутренних напряжений такое устойчивое положение, при котором два (или три) угла слитка упрутся в соответствующие им углы гильзы. Уменьшение скорости износа нижней части гильзы удастся достигнуть только путем рационального подбора скорости вытягивания слитка в зависимости от параметров литья (величина перегрева над температурой ликвидус, химический состав стали, условия смазки зазора между слитком и гильзой и т.п.). Однако следует полагать, что повышенная конусность гильзы в нижней ее части накладывает



Рисунок 2 – Износ нижней части гильзы кристаллизатора после разливки 120 плавков

серьезные ограничения в плане повышения скорости литья (например, при износе стакандозатора) и качества геометрической формы заготовки.

Нельзя не отметить, что большая часть разработчиков и производителей гильз придерживаются мнения, что в нижней части гильзы конусность должна быть меньше, чем рассчитанная в соответствии с усадкой заготовки [7]. Этот подход как бы учитывает уменьшение степени усадки в сравнении с расчетными данными, что обеспечивает уменьшение скорости износа гильзы в нижней части даже в случае увеличения скорости вытягивания слитка до максимально допустимой, а также устраняет возможность "утяжки" гильзы в нижней части, крышкой кристаллизатора при его сборке. Так, использование гильз с уменьшенной конусностью в нижней части в условиях ОАО "Енакиевский металлургический завод" (на сечении заготовки 120×120 мм) позволило повысить среднюю стойкость гильз в среднем на 30...40 % в сравнении с аналогичными гильзами с повышенной конусностью.

Как дополнительное развитие конструкции "параболической" гильзы следует рассматривать техническое решение, заключающееся в том, что в верхней ее части грани выполняются выпуклыми, плавно переходящими в плоскости при-

мерно на середине грани (рисунок 3) [8]. Конструкция такой гильзы, "Convex Mould", предложенная швейцарской фирмой "SMS Concast", позволяет обеспечить более равномерное распределение внутренних напряжений в твердой корочке слитка за счет "разгрузки" углов. Этот факт хорошо подтверждается теоретическими расчетами, учитывающими как рост твердой корочки в кристаллизаторе, так и накопление внутренних напряжений [6,9]. Дополнительным эффектом, сопровождающим работу гильзы "Convex Mould" является более жесткая фиксация положения слитка относительно положения кристаллизатора, что уменьшает скорость локального износа гильзы, в т.ч. и в ее углах. Это соответственно уменьшает эффект искажения профиля заготовки (снижает "ромбичность") и предотвращает появление продольных угловых трещин. По данным разработчиков, гильза конструкции "Convex Mould" обеспечивает увеличение скорости вытягивания заготовки в среднем в 1,5...2,0 раза в сравнении с традиционной двухконусной гильзой. Между тем следует особо обратить внимание на то, что конфигурация такой гильзы представляется достаточно сложной, что существенно удорожает процесс ее изготовления (примерно в 1,5...2,0 раза). При этом к точности воспроизведения требуемой внутренней поверхности гильзы должны предъявляться

высокие требования, поскольку в противном случае будет наблюдаться повышенный износ поверхности гильзы в местах отклонения размеров профиля слитка.

Достаточно близкая к концепции "Convex Mould" конструкция гильзы разработана в российском институте ОАО АХК "ВНИИметмаш" [5,9]. Эти гильзы достаточно хорошо зарекомендовали себя на ОАО "Молдавский металлургический завод" (Рыбница) и РУП "Белорусский металлургический завод" (Жлобин). Однако, как показали исследования, выполненные на ОАО "Енакиевский металлургический завод", при разливке на высоких скоростях гильзы конструкции ОАО АХК "ВНИИметмаш" имеют ограниченный эксплуатационный ресурс (для заготовки сечением 120×120 мм средняя стойкость составила 206 плавов) и выходят из строя преимущественно в связи с износом в нижней части при большом колебании показателя эксплуатационной стойкости. Это, видимо, объясняется несовершенством геометрического профиля гильзы кристаллизатора применительно к высокоскоростной разливке, а также низким качеством наносимого защитного покрытия. Дополнительным технологическим фактором, влияющим на износ гильз, является повышенная скорость вытягивания слитка, которая наблюдается при увеличении внутреннего диаметра стаканов-дозаторов в ходе литья.

Не менее значимым элементом конструкции

гильзы является радиус сопряжения граней и характер изменения конусности в углах по ее высоте [10]. Достаточно очевидно, что если радиус сопряжения увеличивается, то соответственно увеличивается протяженность газового зазора по углам гильзы. Это приводит к утоншению корочки слитка в углах и в критических случаях обуславливает образование угловых трещин. Следовательно, с точки зрения улучшения условий формирования слитка в кристаллизаторе целесообразно выбирать минимальный радиус сопряжения граней. Вместе с тем, уменьшение радиуса сопряжения граней гильзы имеет определенные ограничения технологического характера. Во-первых, сама технология изготовления гильзы предполагает наличие определенного технологического радиуса, а во-вторых, при уменьшении радиуса сопряжения возрастает вероятность появления угловой трещины в процессе эксплуатации гильзы вследствие повышения концентрации напряжений по углам. Обычно рациональный радиус сопряжения граней гильзы составляет 3...5 мм.

Характер изменения конусности в углах гильзы по ее высоте обычно определяется условиями затвердевания углов слитка. Принято считать, что углы затвердевают быстрее и поэтому конусность в углах должна быть несколько выше. Однако чрезмерно быстрое наращивание твердой корочки в углах слитка ведет к повышению в ней внутренних напряжений, что может

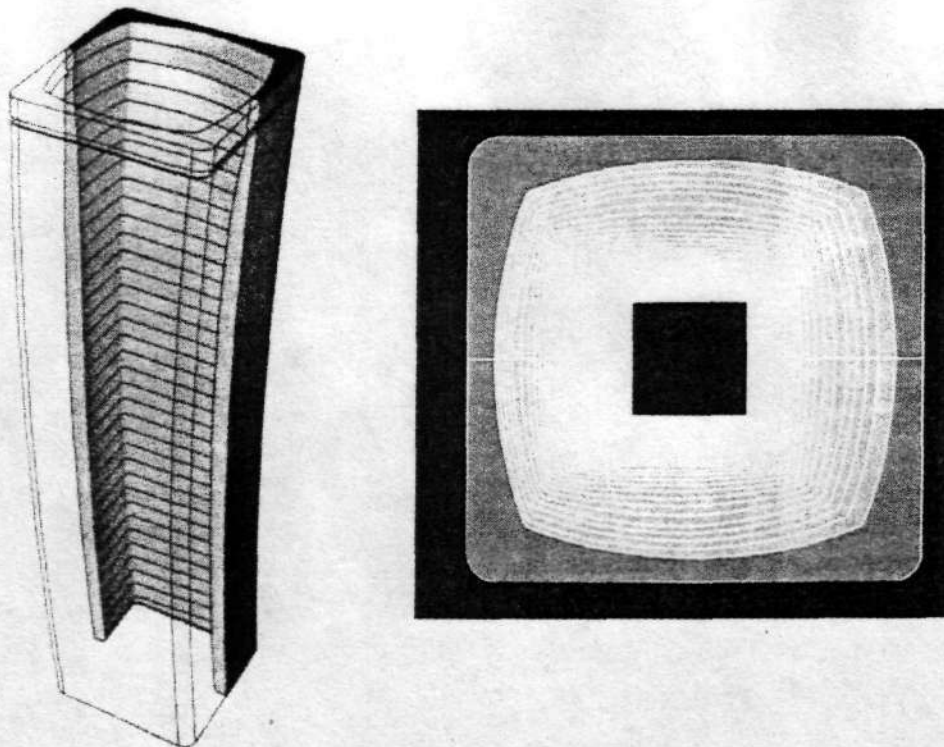


Рисунок 3 – Общий вид, профиль (слева) и вид сверху (справа) гильзы кристаллизатора конструкции "Convex Mould"

обусловить деформацию геометрии профиля слитка. Поэтому в конструкции гильзы кристаллизатора "HS Mould" японской фирмы "Sumitomo Heavy Industries, Ltd" конусность углов меньше, чем граней, а радиус сопряжения граней вверху гильзы в несколько раз меньше, чем в нижней части [11]. Собственно в концепции кристаллизатора для высокоскоростного литья предусмотрена возможность раздельного задания конусности угловых зон и средней части стенок. В такой гильзе благодаря соответствующему выбору конусности затвердевшая оболочка в углах поджимается, тем самым, уменьшая воздушный зазор. Это обеспечивает уменьшение трения между слитком и гильзой, стабильность процесса литья в широком диапазоне скоростей вытягивания слитка, а также повышает качество заготовки и предотвращает ее "ромбичность".

В конструкции "DIA Mould" фирмы "Siemens VAI" (Германия-Австрия) грани в нижней части гильзы выполнены с определенной вогнутостью внутрь слитка, что позволяет удерживать отливаемый слиток в заданном положении. При этом максимальный контакт между поверхностями слитка и гильзы в ее нижней части достигается в районе середины граней, а углы слитка практически не контактируют с углами гильзы [12]. По данным разработчиков такая конструкция обеспечивает увеличение скорости вытягивания слитка в сравнении с обычной двухконусной гильзой при увеличении эксплуатационной стойкости. Кроме того, конструкция гильзы с вогнутыми в нижней части гранями позволяет разливать большой марочный спектр сталей в широком диапазоне скоростей вытягивания заготовки. Однако изготовление таких гильз требует существенных дополнительных затрат в силу их сложной конфигурации. По самым средним оценкам затраты на изготовление гильзы конструкции "DIA Mould" примерно в 1,5 раза выше, чем обычной с "параболическим" профилем, в силу ее сложной конфигурации.

Обобщая рассмотренные данные относительно возможных путей развития конструкции гильз кристаллизаторов для высокоскоростных сортовых МНЛЗ, следует отметить, что достигнутое в 1,5...2,5 раза повышение скорости вытягивания слитка следует, прежде всего, связывать с оптимизацией конфигурации внутренней полости гильзы кристаллизатора в соответствии с усадкой стали в процессе продвижения слитка вниз, т.е. с применением концепции "параболического" профиля. Применение различного рода усовершенствований типа придания граням гильзы определенной выпуклости или вогнутости на определенных участках гильзы в основ-

ном способствует повышению стабильности процесса литья за счет более плотной фиксации положения слитка внутри гильзы и соответственно более равномерного отвода тепла от слитка по периметру и высоте. Между тем, практических данных, подтверждающих возможность существенного повышения скорости вытягивания слитка в сравнении с "параболической" гильзой, в литературе не обнаружено. Отличия же в величине скорости вытягивания слитка на уровне 0,5...0,6 м/мин следует в большей степени относить к различного рода технологическим и конструктивным особенностям конкретной МНЛЗ.

Однако теоретические расчеты условий затвердевания слитка в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ показывают, что возможный ресурс повышения скорости формирования твердой корочки в медной гильзе далеко еще не исчерпан. Например, по данным Ч. Ли и Б. Томаса технологически возможная скорость вытягивания квадратного слитка сечением 120×120 мм может составлять 6,0 м/мин [13]. Следовательно, для дальнейшего повышения скорости вытягивания, видимо, следует обеспечивать более интенсивный и равномерный отвод тепла непосредственно от гильзы кристаллизатора. При этом необходимо также принимать во внимание тот факт, что интенсивность теплопередачи достигает максимальных значений на участке прямого контакта поверхности гильзы с жидкой сталью (т.е. на расстоянии 80...150 мм под мениском) и оказывается в несколько раз меньше в нижней части кристаллизатора [14]. Соответственно, дальнейшее повышение интенсивности и эффективности процесса отвода тепла от гильзы может быть достигнуто в случае применения дифференцированной схемы отвода тепла с учетом особенностей передачи тепла от стали к внутренней стенке гильзы как по высоте, так и по ее сечению.

На металлургическом заводе "Badische Stahlwerke GmbH" (Германия), имеющем в своем составе две дуговые сталеплавильные печи (емкостью 90 т каждая) и две 5-ти ручьевые сортовые МНЛЗ (базовый радиус 6,2 м), реализована система струйно-водяного охлаждения гильзы кристаллизатора, которая обеспечивает более эффективный отвод тепла от гильзы. Для охлаждения граней гильзы кристаллизатора используются 32 форсунки, расположенные на 4-х стояках, и 28 форсунок на 4-х стояках – для охлаждения углов гильзы. Сами гильзы кристаллизатора имеют "параболический" профиль и выполнены из меди (толщина стенок 11 мм) с хромовым покрытием рабочей поверхности. Средняя стой-

кость гильзы кристаллизатора составляет 454 плавки [15]. В 2004 г. завод достиг годового производства 1,964 млн. т за 316,5 дня, что соответствует общей средневзвешенной скорости вытягивания слитка 3,67 м/мин и обеспечивается реальной технологической скоростью на уровне 4,3 м/мин для сечения 130×130 мм.

Выводы

Таким образом, используемые в практике непрерывного литья сортовой заготовки различного рода "параболические" гильзы в целом обеспечивают повышение скорости литья в 1,5...2,5 раза в сравнении с традиционными двухконусными гильзами. В конструкционном плане "параболические" гильзы имеют конфигурацию, учитывающую уменьшение сечения слитка, вызванное его усадкой. При этом разработчики и производители изменяют конусность гильз в нижней ее части в соответствии с их представлениями об условиях ее эксплуатации, а также допускают увеличение конусности в углах гильзы. В целом же для большинства известных конструктивных решений "параболических" гильз достигаемая скорость вытягивания слитка находится примерно на одном уровне. Дальнейшее увеличение скорости, видимо, может быть достигнуто лишь за счет радикальных усовершенствований конструкции кристаллизатора, в т.ч., например, и посредством струйного охлаждения внешней поверхности гильзы.

1. Смирнов А.Н., Штепан Е.В., Смирнов Е.Н. Опыт производства сортовых заготовок для длинномерного проката / *Металл.* – 2005. – №1. – С. 44-50.
2. Шалимов А.Г. Высокоскоростная непрерывная отливка стальных заготовок / ОАО "Черметинформация". Приложение "Сталеплавильное производство". Новости черной металлургии за рубежом // – М.: ОАО "Черметинформация", 2003. – С. 3-21.
3. Wolf M. Continuous casting of billets from large ladles / *MPT.* – 1983. – №4. – P. 36-46.
4. Хорбах У., Коккендидт Й., Юнг В. Скоростное литье сортовых заготовок через кристаллизаторы с параболической конусностью / *Черные металлы.* – 1998. – №5. – С. 19-25.
5. Гильзовые кристаллизаторы высокоскоростных сортовых МНЛЗ / В.Б. Ганкин, Б.А. Спивак, Г.И. Николаев и др. // *Тяжелое*

- машиностроение. – 1997. – №5. – С. 19-22.
6. *Analys of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting* / J.K. Park, C. Li, B. Thomas, I.V. Samarasekera // *Proceedings 60th Electric Furnace Conference. ISS.* – Warrendale: PA, 2002. – P. 669-685.
7. Wolf M. Can mini mills cope with high speed casting? / *Steel Times International.* – 1989. – №3. – P. 16-19.
8. Cobelli P., Tercelli C., Kohl S. Continuous Casting of Long Product (Billet and Bloom Quality) / *Proceedings Conference "Long Products – The Challenge & Opportunity".* – Jamshedpur (India), 2004. – P. 1-21.
9. Промышленные испытания гильз кристаллизаторов ВНИИМЕТМАШ на сортовой МНЛЗ РУП "Белорусский металлургический завод" / В.А. Маточкин, А.В. Демин, В.Б. Ганкин и др. // *Сб. научн. тр. межд. научно-техн. конф.* – М.: ОАО АХК "ВНИИметмаш", 2004. – С. 126-129.
10. Park J.K., Thomas B.G., Samarasekera I.V. *Analys of Thermo-Mechanical Behavior in Billet Casting with Different Mould Corner Radii / Ironmaking and Steelmaking.* – 2002. – Vol.29. No.5. – P. 1-17.
11. *High Speed Casting Mold for Continuously Cast Billet* / T. Kanazawa, K. Abe, N. Fukuda et. al. // *Zairyo to Prosesu (Current Advances in Materials and Processes).* – 2002. – No.15. – P. 749.
12. *Высокоскоростное литье мелкосортовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором "Дайэмоулд"* / Ф. Виммер, Х. Тене, Л. Пекштфинер и др. // *Сталь.* – 1999. – №6. – С. 22-26.
13. Li C., Thomas B. Maximum casting speed for continuous casting steel billets based on submold bulging computation / *85th Steelmaking Conf. Proceedings. ISS.* – Warrendale: PA, 2002. – P. 109-130.
14. Hebert L., Gilles T. Development of thermal solidification models for Bethelhem's slab caster / *Steelmaking Conf. Proceedings.* – Dallas: TX, 1993. – Vol.76. – P. 315-328.
15. Schweikle R., Volkert A., Barbe J. High efficiency and reliability, and high casting speed on the billet casters at BSW / *5th European Continuous Casting Conference in Nice. Proceedings.* – Paris: La Revue de Metallurgie, 2004. – P. 382-389.

Статья поступила 23.06.2009 г.

© А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов, 2009
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько