

*к.т.н. Ухин В.Е.  
(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»  
г. Донецк, Украина, lemvladimir@i.ua)*

## СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО КОНСТРУКЦИЙ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА СОРТОВУЮ ЗАГОТОВКУ

*Рассмотрены относительно возможные пути развития конструкции гильзы кристаллизатора для высокопроизводительных 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.*

*Ключевые слова: непрерывнолитая сортовая заготовка, гильза кристаллизатора, конусность, прорыв металла.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Внедрение в современных сталеплавильных цехах мероприятий, направленных на повышение производительности плавильных агрегатов за счет увеличения рабочего пространства, вследствие использования более качественных огнеупорных материалов, применения мер по интенсификации плавки, использования систем автоматизации технологических процессов и других операций, позволяет, как показала практика, увеличить их мощность на 15 – 20 %. Тем не менее, такое улучшение показателей требует от предприятия разливать дополнительное количество металла, что не возможно без модернизации МНЛЗ.

Один из методов повышения производительности непрерывной разливки стали заключается в пристройке дополнительного ручья к действующей МНЛЗ. Однако этот способ требует значительных капитальных вложений, остановки машины, а также не всегда осуществим из-за конструктивных особенностей цеха. Наиболее эффективным способом повышения производительности МНЛЗ позволяющим не только разливать дополнительное количество стали, но и синхронизировать работу технологической цепочки «сталеплавильный агрегат – установка ковш-печь – машина непрерывного литья заготовки» является увеличение скорости вытяжки заготовки.

**Постановка задачи.** Так как технологическим узлом, лимитирующим возможность увеличения скорости разливки, является кристаллизатор (из-за необходимости отводить большее количество тепла и обеспечивать оптимальный контакт корочки заготовки с гильзой при новых условиях разливки), необходимо рассмотреть основные типы гильз кристаллизаторов для высокопроизводительного литья сортовых заготовок.

**Изложение материала и его результаты.** В связи с тем, что гильзы кристаллизаторов для непрерывной разливки стали в Украине не производят был выполнен анализ известных литературных источников и рекламных проспектов ведущих мировых разработчиков и производителей который показал, что основные типы конструкции геометрической формы 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.

На рисунке 1 приведено сравнение геометрических профилей гильз фирм-производителей "Europa Metalli" (Италия), "КМЕ" (Германия), "Shinko Metal Product" (Япония), "Abax" (КНР-Германия) и АХК "ВНИИметмаш" (Россия), измеренных нами по середине граней для заготовки сечением 120x120 мм.

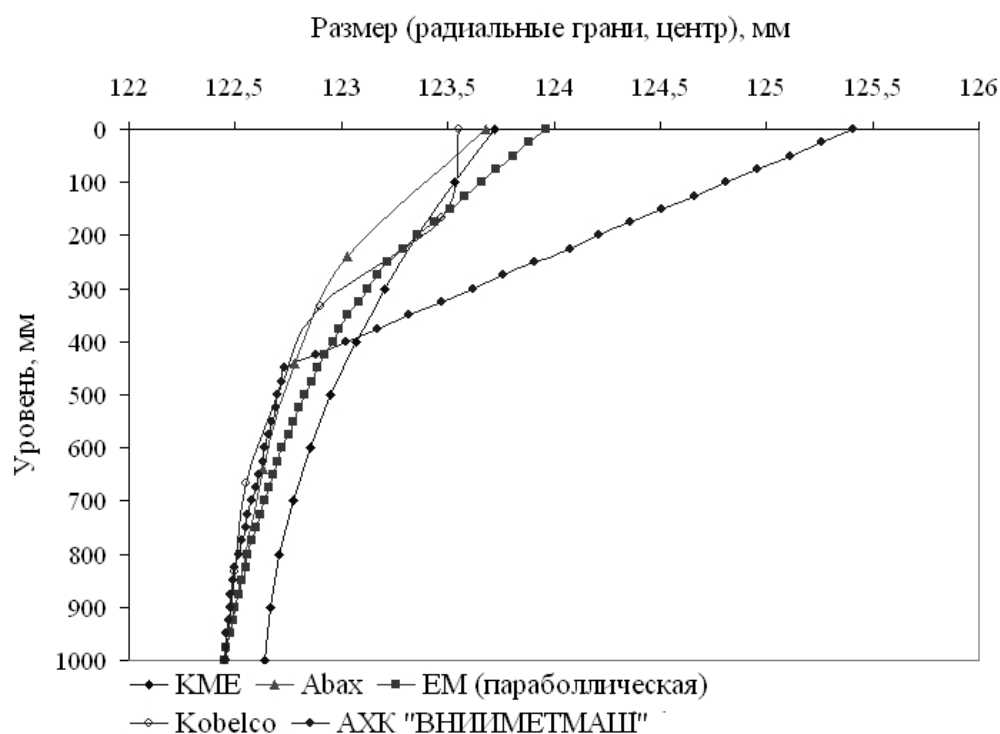


Рисунок 1 – Сравнение профилей гильз различных фирм-производителей

Обобщая приведенные данные, следует отметить, что геометрический профиль гильзы 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 начинает формироваться и легко поддается деформации);

*III* – участок, расположенный под участком *II* и обеспечивающий наращивание твердой корочки в заготовке по мере ее продвижения вниз (на этом участке собственно формируется геометрическая форма заготовки);

*IV* – нижняя часть гильзы протяженностью 250-300 мм (на этом участке происходит образование установившихся воздушных зазоров между внутренней по-

верхностью гильзы и заготовкой как по углам, так и по граням, что оказывает существенное влияние на условия затвердевания заготовки).

Почти во всех исследованных конструкциях гильз участки *II* и *III* имели закон изменения конусности, который близок к расчетным значениям, учитывающим усадку заготовки при затвердевании. Исключение составила трехконусная гильза конструкции «ВНИИметмаш», имеющая выпуклые грани на первом и втором участке, которые плавно переходят в плоскость на третьем 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. Именно участки *II* и *III* 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 участке. Это объясняется тем фактом, что именно на этом участке появляется высокая вероятность возникновения неравномерного воздушного зазора между заготовкой 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. Соответственно появление воздушного зазора тормозит рост твердой корочки, а при неравномерном воздушном зазоре по граням и углам (что представляется наиболее вероятным) может происходить деформация профиля заготовки, что приводит к развитию дефекта типа «ромбичность». Недостаточное охлаждение заготовки 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, «Europa Metall», «Абах») предпочитают иметь в нижней части гильзы повышенную конусность (превышающую расчетные значения, соответствующие параболе), 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 является сравнительно быстрый износ в нижней части, который начинается с истирания защитного покрытия, а затем и непосредственно тела медной гильзы. 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» в заготовке,

поскольку износ гильзы в углах дает возможность деформироваться твердой корочке заготовки и занять под действием внутренних напряжений такое устойчивое положение, при котором два (или три) угла заготовки упрутся в соответствующие им углы гильзы. Уменьшение скорости износа нижней части гильзы удается достигнуть только путем рационального подбора скорости вытяжки заготовки в зависимости от параметров литья (величина перегрева над температурой ликвидус, химический состав стали, условия смазки зазора между заготовкой и гильзой и т.п.). Однако следует полагать, что повышенная конусность гильзы в нижней ее части накладывает серьезные ограничения в плане повышения скорости литья (например, при износе стакана-дозатора) 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. Этот подход учитывает уменьшение степени усадки в сравнении с расчетными данными, что обеспечивает уменьшение скорости износа гильзы в нижней части даже в случае увеличения скорости вытяжки заготовки до максимально допустимых, а также устраняет возможность «утяжки» гильзы в нижней части крышкой кристаллизатора при его сборке. Так, использование гильз с уменьшенной конусностью в нижней их части в условиях ПАО «Енакиевский металлургический завод» (на сечении заготовки 120x120 мм) позволило повысить среднюю стойкость гильз в среднем на 30-40% в сравнении с аналогичными гильзами с повышенной конусностью [1].

Как дополнительное развитие конструкции параболической гильзы следует рассматривать техническое решение, заключающееся в том, что в верхней ее части грани выполнены выпуклыми, которые плавно переходят в плоскости примерно на середине грани (рисунок 2) [2]. Конструкция

такой гильзы “CONVEX MOULD”, предложенная швейцарской фирмой “CONCAST”, позволяет обеспечить более равномерное распределение внутренних напряжений в твердой корочке за счет «разгрузки» углов. Этот факт хорошо подтверждается теоретическими расчетами, учитывающими как рост твердой корочки в кристаллизаторе, так и накопление внутренних напряжений. Дополнительным эффектом, сопровождающим работу гильзы “CONVEX MOULD” является более жесткая фиксация положения заготовки относительно положения кристаллизатора, что уменьшает скорость локального износа гильзы, в том числе 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 вытяжки 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 представ-

ляется 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.

Другой интересной технологией производства фирмы “CONCAST” является конструкция так называемого кристаллизатора с «гибкой» секцией вторичного охлаждения (рисунок №3) [3]. Кристаллизатор состоит из двух частей:

- первая – медная гильза с внешним охлаждением водой длиной 400 мм;
- вторая – зона «гибкого» охлаждения состоящая из набора медных пустотелых пластин соединенных в виде квадратного профиля. Для каждой из пластин обеспечивается индивидуальный режим охлаждения и возможность перемещения для приобретения необходимой конусности секции.

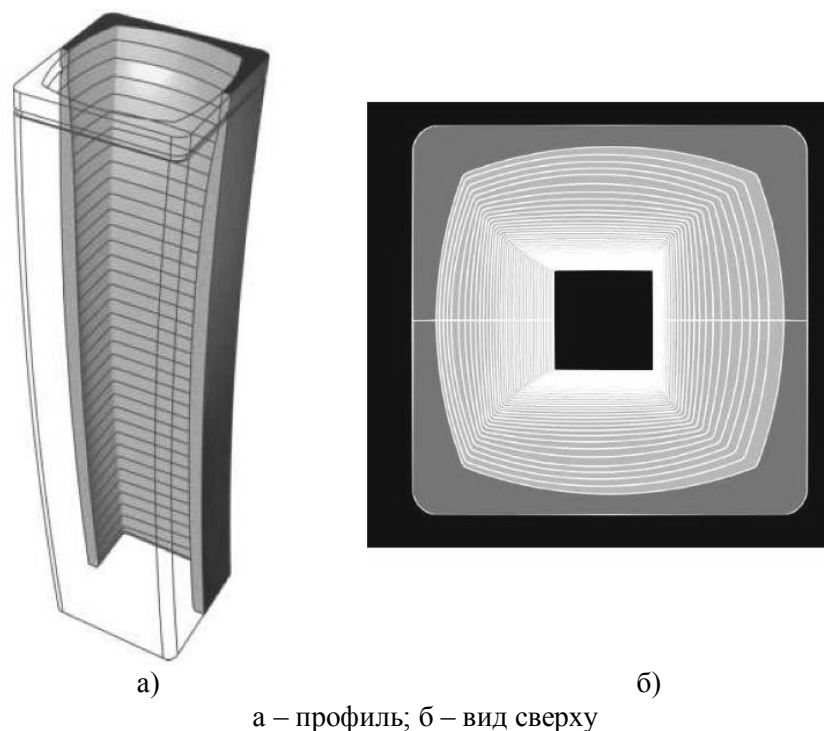
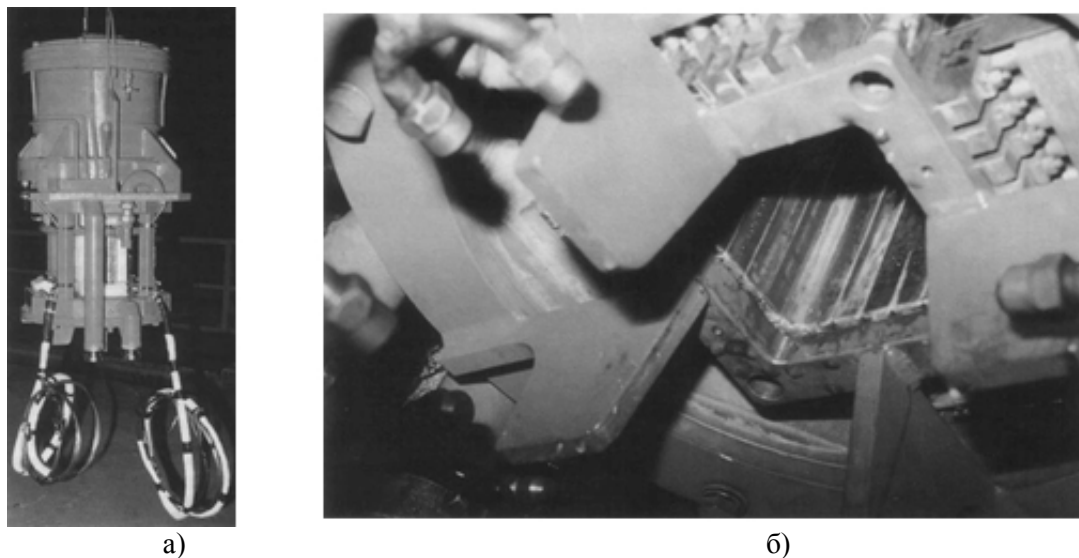


Рисунок 2 – Кристаллизатора конструкции “CONVEX MOULD”.



а) кристаллизатор в сборе; б) внешний вид «гибкой» секции

Рисунок 3 – Кристаллизатора с «гибкой» секцией вторичного охлаждения

Промышленные испытания описанного выше кристаллизатора показали высокую эффективность его работы. Так, например, средний тепловой поток в секции вторичного охлаждения кристаллизатора ( $1,64 \text{ МВт/м}^2$ ) в полтора раза выше по сравнению с традиционным гильзовым кристаллизатором ( $1 \text{ МВт/м}^2$ ), что объясняется отсутствием газового зазора. Также за весь период промышленных испытаний ромбичность заготовки практически отсутствовала (не превышала 2-х мм) [3].

Не менее значимым элементом конструкции гильзы является радиус сопряжения граней и характер изменения конусности в углах по ее высоте. Достаточно очевидно, что если радиус сопряжения увеличивается, то соответственно увеличивается протяженность газового зазора по углам гильзы. Это приводит к утоньшению корочки заготовки в ее углах и в критических случаях обуславливает образование угловых трещин. Следовательно, с точки зрения улучшения условий формирования заготовки 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 на-

личие 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 заготовки. Принято считать, что углы затвердевают быстрее и поэтому конусность в углах должна быть несколько выше. Однако чрезмерно быстрое наращивание твердой корочки в углах заготовки ведет к повышению в ней внутренних напряжений, что может обусловить деформацию геометрии профиля заготовки. Поэтому в конструкции гильзы кристаллизатора «HS MOULD» японской фирмы „Sumitomo” конусность углов меньше, чем граней, а радиус сопряжения граней вверху гильзы в несколько раз меньше, чем в нижней части [4]. Собственно в концепции кристаллизатора для высокопроизводительной разливки предусмотрена возможность отдельного 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 заготовкой и гильзой, стабильность процесса литья в широком диапазоне скоростей вытяжки заготовки, а также повышает качество заготовки и предотвращает ее ромбичности.

В конструкции "DIA MOULD" австрийской фирмы (рисунок 4) "VAI" грани в нижней части гильзы выполнены с определенной вогнутостью внутрь заготовки, что позволяет удерживать отливаемую заготовку в заданном положении. При этом максимальный контакт между поверхностями заготовки и гильзы в ее нижней части достигается в районе середины граней, а углы заготовки практически не контактируют с углами гильзы [5]. По данным разработчиков такая конструкция обеспечивает возможность увеличение скорости вытяжки заготовки 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 широкий диапазон скоростей вытяжки. 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.

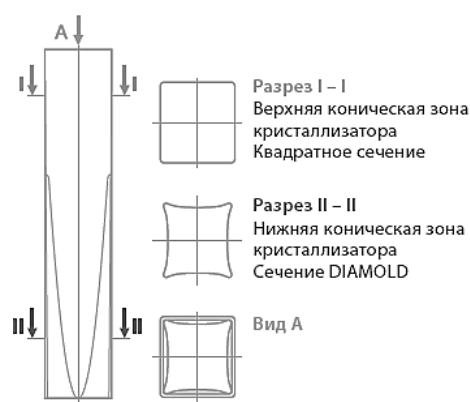


Рисунок 4 – Геометрия кристаллизатора DIA MOULD

Итальянская фирма DANIELI воплотила свое видение современного кристаллизатора для высокопроизводительной непрерывной разливки сортовых заготовок в кристаллизаторе конструкции «Danam». Особенностью этой технологии является использование повышенного давления жидкости (10 атм.) в охлаждающих каналах, что улучшает отвод тепла и препятствует искажению профиля гильзы в верхней части, и в свою очередь оптимизирует контакт корочки заготовки по длине кристаллизатора.

Обобщая рассмотренные данные относительно возможных путей развития конструкции гильз кристаллизаторов для высокопроизводительных сортовых МНЛЗ, следует отметить, что достигнутое в 1,5-2,5 раза повышение скорости вытяжки заготовки следует, прежде всего, связывать с оптимизацией конфигурации внутренней полости гильзы в соответствии с усадкой стали в процессе движения заготовки вниз, то есть с применением концепции «параболического» профиля и интенсификации охлаждения. Применение различного рода усовершенствований типа придания граням гильзы определенной выпуклости или вогнутости на определенных участках гильзы в основном способствует повышению стабильности процесса литья за счет более плотной фиксации положения заготовки внутри гильзы и соответственно более равномерного отвода тепла от заготовки по ее периметру и высоте. Между тем, практических данных, подтверждающих возможность существенного повышения скорости вытяжки заготовки в сравнении с «параболической» гильзой, в литературе не обнаружено. Отличия же в величине скорости вытяжки заготовки 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 заготовки 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 вытяжки квадратной заготовки сечением 120x120 мм может составлять 6,0 м/мин. Следовательно, для дальнейшего повышения скорости вытяжки сортовой заготовки, 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 (то есть на 80-150 мм под мениском) и оказывается в несколько раз меньше в нижней части кристаллизатора [6]. 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” (Кельх, Германия), имеющем в своем составе 2 дуговых сталеплавильных печи (емкостью 90 т каждая) и две 5-ти ручьевых сортовые МНЛЗ (базовый радиус 6,2 м), реализована система струйно-водяного охлаждения гильзы кристаллизатора, которая обеспечивает более эффективный отвод тепла от гильзы (рисунок 5). Для охлаждения граней гильз кристаллизаторов используют 32 форсунки, расположенные на 4-х стояках, и 28 форсунок на 4-х стояках для охлаждения углов гильзы. Сами гильзы кристаллизаторов имеют параболический профиль и выполнены из меди (толщина стенок 11 мм) с хромовым покрытием рабочей поверхности. Средняя стойкость гильзы кристаллизатора составляет 454 плавки [7]. В 2004 г. завод достиг годового производства 1,964 млн.т за 316,5 дня, что соответствует общей средневзвешенной скорости литья 3,67 м/мин и обеспечивается реальной технологической скоростью разливки на уровне 4,3 м/мин для сечения 130x130 мм.

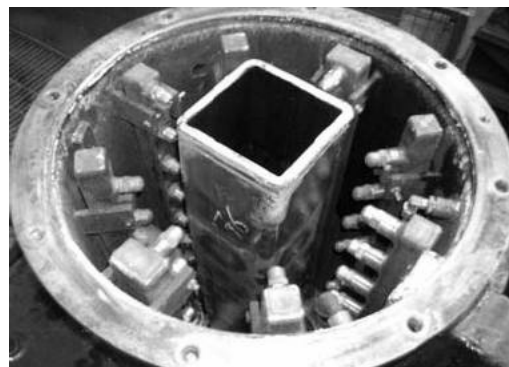


Рисунок 5 – Внешний вид кристаллизатора со струйно-водяным охлаждением гильзы

Одной из проблем непрерывной разливки мелкосортных заготовок является негативное влияние турбулентных потоков металла на формирование корочки в зоне мениска. Так как эта зона расположена в кристаллизаторе, турбулентность нарушает процесс начала затвердевания, что приводит к ухудшению качества поверхностных и подповерхностных зон. Применение погружных стаканов при разливке мелкосортных сортовых заготовок не представляется возможным из-за ограниченного пространства в кристаллизаторе. Эта проблема была решена применением кристаллизатора с так называемым «свободным» мениском (рисунок 6) на металлургических предприятиях ALLEVADR ACIERS (Франция) и HOOGOSENS (Голландия).

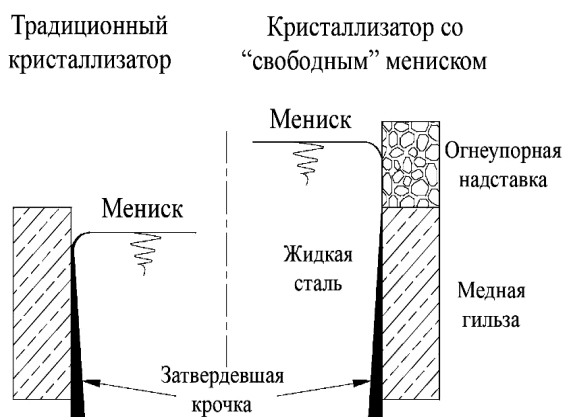


Рисунок 6 – Схема, показывающая отличие конструкции кристаллизатора со «свободным» мениском от традиционного

Особенностью данного кристаллизатора является наличие огнеупорной надставки, которая смещает зеркало металла выше медной гильзы, а следовательно, от зоны начала затвердевания, что нивелирует влияние гидродинамических возмущений в зоне мениска и его формы на формирование корочки. Применение данной технологии на вышеуказанных предприятиях позволило получить постоянную и гомогенную поверхность заготовки, уменьшить глубину следов качания и устранить такой дефект поверхности как завороты корочки [8].

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

Используемые в практике разлива сортовой заготовки различного рода «параболические» гильзы в целом обеспечивают повышение скорости литья в 1,5-2,5 раза в сравнении с традиционными двухконус-

ными гильзами. В конструкционном плане «параболические» гильзы имеют конфигурацию, учитывающую уменьшение сечения заготовки, вызванное ее усадкой. При этом разработчики и изготовители 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 разлива находится примерно на одном уровне. Дальнейшее увеличение скорости литья, видимо, может быть достигнуто лишь за счет радикальных усовершенствований конструкции кристаллизатора, в том числе, например, и посредством струйного охлаждения внешней поверхности гильзы.

#### **Библиографический список**

1. Смирнов А.Н. *Современные решения в конструкции кристаллизаторов для высокоскоростного литья сортовых МНЛЗ* / А.Н.Смирнов, Е.Ю. Жибоедов, И.В. Лейрих // *Электрометаллургия*. – 2006. – №11. – С.22-28.
2. Cobelli, P. *Continuous Casting of Long Product (Billet and Bloom Quality)* / P. Cobelli, C. Terzelli, S. Kohl // *Proceedings Conference “Long Products – The Challenge & Opportunity”*. – Jamshedpur (India), 2004. – P. 1-21.
3. Kawa F. *CONCAST experimental mould with a flexible secondary cooling section* / F.Kawa // *Concast standard news*. – 1992. – Vol. 31, 2. – P. 4-7.
4. Kanazawa T. *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. – № 15. – P.749.
5. Fuchshuber J. *Modern billet casting technology* / J. Fuchshuber, G. Zedebauer // *Continuous casting. Millennium steel*. – 2004. – P. 162 - 167.
6. Thomas B.G. *Study of CC narrow face design – influence of the casting speed and steel composition* / B.G. Thomas, M. Dziuba, G. Di Gresia // *14th IAS Steelmaking Conference – San Nicolas, Argentina*, 2003. – P. 87-95.
7. Шмит М. *Высокие надежности и производительность машин непрерывной разлива сортовой стали на заводе Badische Stahl Werke*. / М. Шмитт, А. Флокерт, Ж. Барбе, Р. Швейкле, Д.Г. Еланский // *Сталь*. – 2008. – № 2. – С. 22-23.
8. Bertolletti C. *Meniscus free casting: metallurgical and technological results* / C. Bertolletti, P. Courbe, J.M. Jolivet, P.P. Naveau, A. Oper, E. Perin C. Salaris, A.L. Spierings E. Weisseldinger // *3rd European conference on continuous casting*. – Madrid. October 20 - 23, 1998. – P. 65-74.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.**

*Статья поступила в редакцию 01.07.13.*

**к.т.н. Ухін В.Є. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»(м. Донецьк, Україна)  
СУЧАСНІ РІШЕННЯ ЩОДО КОНСТРУКЦІЙ ГІЛЬЗ КРИСТАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ  
ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА СОРТОВУ ЗАГОТОВКУ**



*Розглянуті відносно можливі шляхи розвитку конструкції гільзи кристалізатора для високопродуктивних сортових МБЛЗ. Використовувані в практиці безперервного лиття сортової заготовки різного роду "параболічні" гільзи в цілому забезпечують підвищення швидкості лиття в 1,5...2,5рази в порівнянні із традиційними двохконусними гільзами.*

**Ключові слова:** *безперервнолита сортова заготовка, гільза кристалізатора, конусність, прориви металу.*

**Ukhin V.E.** (SHEE "Donetsk National Technical University "Donetsk, Ukraine)

**MODERN DESIGN SOLUTIONS FOR THE HIGH PRODUCTIVITY BILLET CASTERS  
MOULDS**

*The possible ways of the high productivity billet casters moulds design development were considered. "Parabolic" moulds practical usage provides casting speed increasing for 1.5 ... 2.5 times compared with the conventional double cone moulds.*

**Key words:** *continuous cast billet, mould tube, taper, breakouts.*