

УДК621.74.047: 620.191.355

к.т.н. Куберский С. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ И ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

*Показано влияние следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки на ее качество и выход годного металла. С использованием физического моделирования исследовано влияние рельефной поверхности медных подложек на интенсивность теплоотвода и их смачивание различными расплавами. Установлено позитивное влияние на уменьшение глубины следов качания снижения плотности теплового потока в районе жидкого мениска, а также смачиваемости стенок кристаллизатора расплавами стали и ШОС. Предложена новая конструкция кристаллизатора с прямоугольными пазами в верхней части его рабочей поверхности. Обоснованы размеры и шаг пазов, а также место их расположения и занимаемая площадь.*

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, кристаллизатор, качание, следы, гребешки, качество, поверхность, шероховатость, теплоотвод, мениск, смачивание, затекание.

Кристаллизатор представляет собой один из наиболее важных узлов, определяющих рациональную работу МНЛЗ (МПНЛЗ) и оптимальное качество непрерывнолитой заготовки. Кристаллизатор выполняет функцию приема жидкого металла, попадающего в него из промежуточного ковша, а также перевода части жидкой стали в твердое состояние посредством отвода тепла с охлаждающей водой. При этом в кристаллизаторе происходит формообразование заготовки.

Конструкция кристаллизатора играет важную роль как с точки зрения его эксплуатационных возможностей, так и относительно качества отливаемых заготовок.

Большое влияние на качество непрерывнолитых заготовок, а также конечной металлопродукции, оказывают следы качания, образующиеся при возвратно-поступательном движении кристаллизатора и повышающие вероятность образования различного рода дефектов.

Анализ существующих представлений о механизме образования следов качания [1], а также проведенные с использованием физических моделей исследования [2–6] позволили установить, что наиболее вероятным является механизм, основанный на затвер-

девании мениска и переливе жидкой стали через его край в течение каждого цикла качания кристаллизатора при его движении вниз. При этом, как правило, формируются не только поверхностные складки глубиной 0,4–2,0 мм [2, 7], но и подповерхностные «гребешки», значительно ухудшающие качество непрерывнолитых заготовок.

Геометрическая форма следов качания и характер их проникновения вглубь тела заготовки во многом определяют явление захвата металлом неметаллических включений, пузырьков аргона, вдуваемого в струю, и газов, присутствующих в жидком металле.

В образовании следов качания участвуют шлаковый гарнисаж и рант. В зависимости от параметров качания и условий стабильности уровня мениска их можно классифицировать на три типа [7]: чистые, с лункой, обогащенной ликватами, и с заворотом. Любые складки создают неровности со стороны фронта кристаллизации и затрудняют флотацию неметаллических включений. Складки последнего типа, возникающие при отходе от стенок кристаллизатора оболочки слитка вблизи мениска, особенно неблагоприятны с точки зрения захвата включений. Формирующаяся оболочка может отгибаться при движении шлакового выступа вниз, если гарнисаж

прочно удерживается на стенках кристаллизатора. В дальнейшем, при вытягивании слитка из кристаллизатора жидкий металл переливается через отошедшую от стенок кристаллизатора оболочку и, частично оплавляя шлаковый выступ, образует верхнюю половину складки. Поэтому область следа качания может быть насыщена неметаллическими включениями и газовыми пузырями. Пузырьки газа, всплывающие с глубины расплава, могут концентрироваться в районе гребешка и оставаться в подповерхностном слое заготовки, снижая тем самым однородность металла и его качество.

Глубокие следы качания являются концентраторами напряжений на поверхности непрерывнолитых заготовок, снижают прочность металла в месте их расположения, могут перерасти в поперечные трещины, а также снижают выход годного ввиду необходимости более глубокой зачистки непрерывнолитых заготовок и повышенной отбраковки.

В работах [2, 4] показано, что для получения качественной поверхности заготовок по неровностям и подповерхностного их слоя с минимальным содержанием неметаллических включений и газовых пузырей необходимо снижать глубину проникновения следов качания и связанных с ними гребешков в тело корочки, формирующейся на начальной стадии кристаллизации. Кроме того, установлена зависимость влияния величины перегрева на глубину внедрения гребешка в тело формирующейся заготовки и показано, что увеличение температуры модельной жидкости приводит к снижению глубины проникновения гребешка в заготовку в результате снижения скорости кристаллизации мениска и его подплавления более горячим расплавом.

Полученные данные свидетельствуют о том, что аналогичное влияние на процесс формирования следов качания будет оказывать снижение теплоотвода в районе жидкого мениска формирующейся заготовки. Для уменьшения глубины следов качания и проникновения гребешков в тело заготовки

необходимо исключить или минимизировать кристаллизацию корки в районе мениска и в зоне контактного теплообмена. Обеспечить это можно изменением условий теплоотвода в верхней части кристаллизатора. Если уменьшить теплоотвод в районе мениска несформированного слитка, то первичная корочка будет кристаллизоваться на медной стенке, и при этом удастся избежать формирования дугообразной поверхности, а образование корки параллельно стенке кристаллизатора позволит исключить возможность перелива жидкого металла и, следовательно, снизить вероятность образования грубых следов качания и подповерхностных гребешков.

Поэтому основная задача настоящих исследований заключалась в изучении параметров и конструктивных решений, влияющих на теплоотвод в верхней части кристаллизатора МНЛЗ, и усовершенствовании его конструкции для повышения качества поверхности и подповерхностной зоны непрерывнолитых заготовок.

Для повышения качества поверхности непрерывнолитого металла и снижения глубины следов качания применяют технологию разлива стали с пониженным уровнем теплоотвода в верхней его части, что способствует уменьшению температурного градиента в корочке слитка в районе мениска и снижению тепловых напряжений, действующих на нее в период превращения и усадки.

Тепловой поток в верхней части кристаллизатора при высокоскоростной разливке стали достигает  $9 \text{ МВт/м}^2$ , а при разливке меди —  $2 \text{ МВт/м}^2$  [8]. По данным работы [9] снижение теплового потока в районе мениска на 30 % при критической скорости литья среднеуглеродистой стали снижает индекс продольных трещин в 5 раз.

Из практики непрерывной разливки известно множество способов управления теплоотводом в кристаллизаторе путем создания волнистой рабочей поверхности гильзы [10], выполнения канавок на поверхности стенки плоского кристаллизатора [9], изготовления гильзы из менее теп-

лопроводного материала [11], а также нанесения на его рабочую поверхность менее теплопроводного покрытия, которое имеет регламентированную либо изменяющуюся по высоте толщину.

Авторами работы [12] предложено наложение прерывистого высокочастотного магнитного поля взамен качания кристаллизатора. При разливке стали, содержащей 0,12 % углерода, в квадратный кристаллизатор со стороной 150 мм без электромагнитного воздействия на поверхности слитка были обнаружены следы качания кристаллизатора глубиной 0,6–0,7 мм, достигающей в отдельных случаях 1,3 мм. При наложении магнитного поля более 150 кВт шероховатость поверхности слитка значительно уменьшилась, а средняя высота неровностей составила 0,1–0,3 мм. Кроме того, экспериментально показано, что при обычной разливке затвердевание начинается непосредственно от мениска, а при наложении магнитного поля — на некотором удалении от него.

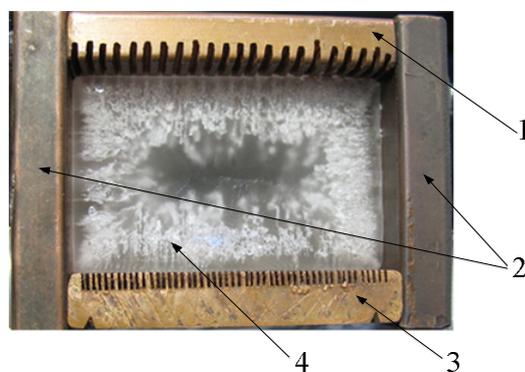
В данной работе были проведены исследования с целью усовершенствования конструкции кристаллизатора путем выполнения в его верхней части прямоугольных пазов для снижения интенсивности теплоотвода в районе кристаллизующегося мениска. Наличие пазов на рабочей поверхности кристаллизатора должно обеспечить уменьшение теплоотдачи от кристаллизующейся корочки к охлаждающей воде, что будет способствовать более мягкому теплоотводу, снижению температурного градиента и возникающих термических напряжений.

Основное внимание было уделено определению места расположения и размеров пазов, а также изучению влияния их на величину теплоотвода, процесс кристаллизации и смачивание поверхности металлическим и шлаковым расплавом.

На первом этапе исследований с использованием физического моделирования было изучено влияние профиля медных стенок на скорость формирования корочки непрерывнолитых заготовок. В качестве моделирующего вещества, как и в работах [2–6], ис-

пользовали камфен (2,2-диметил-3-метиленибициклогептан), который, так же как и сталь, кристаллизуется по дендритной схеме, позволяет моделировать процессы и явления, происходящие в двухфазной зоне, обладает оптической прозрачностью и переходит в твердое состояние в диапазоне температур 33–35°C.

Для моделирования процессов затвердевания из медных пластин размером 62×62×10 мм был изготовлен сборный кристаллизатор с различной конфигурацией рабочей поверхности его стенок (рис. 1).



1, 2, 3 — медные пластины с продольными пазами шириной 1,0–1,5 мм (ср. 1,25 мм), гладкой поверхностью и продольными пазами шириной 0,4–0,5 мм; 4 — камфен

Рисунок 1 Физическая модель сборного кристаллизатора с различной конфигурацией рабочей поверхности стенок

На рабочей поверхности двух медных стенок кристаллизатора были выполнены продольные прямоугольные пазы глубиной 2–3 мм, имеющие различную ширину и шаг между ними (рис. 2, а, б), а две другие имели ровную плоскую поверхность, покрытую техническим углеродом (рис. 2, в).

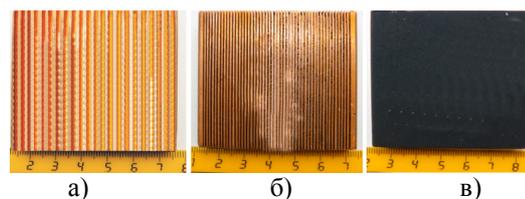


Рисунок 2 Образцы медных пластин с продольными пазами шириной 1,0–1,5 мм (а), 0,4–0,5 мм (б) и гладкой поверхностью (в)

Узкие пазы имели ширину 0,4–0,5 мм (среднее значение 0,45 мм) и располагались с шагом 0,7–1,0 мм (ср. 0,8 мм), а для широких пазов эти значения составляли 1,0–1,5 мм (ср. 1,25 мм) и 1,2–2,0 мм (ср. 1,5 мм) соответственно.

Порядок проведения экспериментов включал следующие основные этапы:

– разогрев камфена на паровой бане до температуры  $38^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ;

– охлаждение сборного кристаллизатора в холодильнике с целью увеличения теплоотвода;

– установка кристаллизатора на ровную поверхность (стекло) и заливка камфена;

– фиксация динамики роста корочки слитка с помощью фотоаппарата и миллиметровой бумаги.

В таблице 1 и на рисунке 3 приведены результаты проведенных экспериментов, а также показана динамика изменения толщины корочки и коэффициента затвердевания модельного вещества по граням кристаллизатора, имеющим различную конфигурацию рабочей поверхности.

Анализ рисунка 3 свидетельствует о том, что для одного и того же времени от начала эксперимента наибольшая толщина корочки и, соответственно, коэффициент кристаллизации имеют место при формировании оболочки у стенки кристаллизатора, имеющей широкие пазы, средние значения изучаемых факторов характерны для гладкой стенки, а минимальные — для стенки с узкими пазами. Толщина корочки, образующейся на гладкой поверхности в первую минуту кристаллизации, на 5–20 % меньше толщины корочки, формирующейся у стенки с широкими пазами, и на 10–20 % превышает это значение, характерное для поверхности, имеющей узкие пазы.

Объясняется это тем, что для случая кристаллизации расплава у стенки с широкими пазами имеет место повышенный уровень теплоотвода, так как увеличивается поверхность контакта медной стенки с формирующейся оболочкой из-за свободного затекания камфена в пазы (рис. 4, а).

Таблица 1

Результаты моделирования затвердевания камфена в кристаллизаторе с различной конфигурацией рабочей поверхности стенок

Время от начала опыта, мин	Толщина корочки, мм			Коэффициент затвердевания, мм/с <sup>0,5</sup>		
	пазы		гладкая стенка	пазы		гладкая стенка
	узкие	широкие		узкие	широкие	
0,25	2,1	2,6	2,5	4,2	5,2	5,0
0,5	2,8	3,5	3,2	4,0	4,9	4,5
1	3,7	4,7	4	3,7	4,7	4,0
2	4,8	6,3	5,1	3,4	4,5	3,6
3	5,3	7	5,6	3,1	4,0	3,2
4	5,7	7,5	6	2,9	3,8	3,0
5	6	7,8	6,3	2,7	3,5	2,8
6	6,4	8	6,7	2,6	3,3	2,7
7	6,8	8,2	7,1	2,6	3,1	2,7
8	7,5	8,5	7,6	2,7	3,0	2,7
9	8,2	8,8	8,1	2,7	2,9	2,7
10	8,5	9,2	8,6	2,7	2,9	2,7

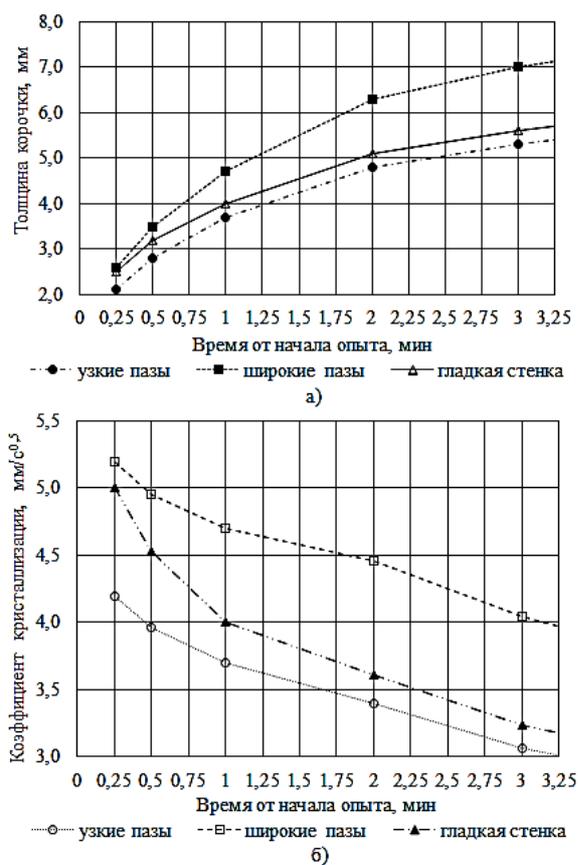


Рисунок 3 Динамика изменения толщины корочки (а) и коэффициента затвердевания модельного вещества (б) по граням кристаллизатора, имеющим различную конфигурацию рабочей поверхности

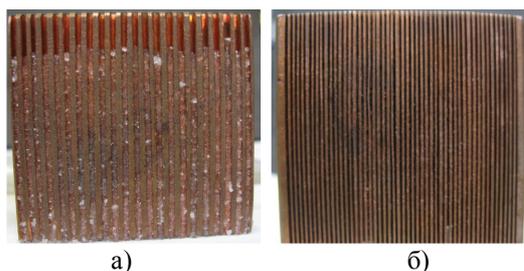


Рисунок 4 Наличие (а) и отсутствие (б) затекания камфена в пазы медных стенок кристаллизатора, зафиксированное после окончания эксперимента

В районе пазов шириной 0,4–0,5 мм затекания камфена в них не наблюдалось (рис. 4, б), что обеспечивало наличие газового зазора, способствующего снижению теплоотвода и, соответственно, скорости роста корочки.

С течением времени разница в скорости кристаллизации снижается, и через 10 мин толщина корочки, сформированной на гладкой поверхности и у стенки с узкими пазами, становится практически одинаковой, а образованной у стенки с широкими пазами превышает их значение на 7–9 %.

Полученные данные свидетельствуют о том, что изготовление на поверхности медных стенок кристаллизатора прямоугольных пазов шириной 0,4–0,5 мм, в которые не проникает жидкий расплав, способствует снижению теплоотвода на 10–20 %, что благоприятно скажется на улучшении качества поверхности непрерывнолитого слитка, обусловленного формированием грубых следов качания.

После извлечения слитка из кристаллизатора было установлено, что для части слитка, кристаллизовавшейся у стенки с узкими продольными пазами (рис. 5, а), характерна слегка волнообразная поверхность, а поверхность, образованная у стенки с широкими пазами (рис. 5, б), имеет явно выраженные ребра, размеры которых по ширине и высоте равны ширине и глубине пазов, выполненных на рабочей поверхности медных пластин.

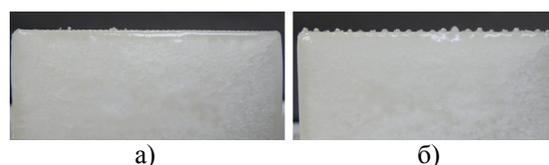


Рисунок 5 Неровности на поверхности слитка, сформированной у стенок с пазами

Важным фактором, влияющим на параметры теплоотвода и формирование непрерывнолитого слитка, является смачивание расплавом и ШОС поверхности кристаллизатора. При хорошем смачивании кристаллизатора расплавом обеспечивается повышение теплоотвода. Несмачивание поверхности кристаллизатора каплями ШОС облегчает проникновение их в зазор между поверхностями заготовки и кристаллизатора [13, 14]. Кроме того, для случая хорошего смачивания рабочей поверхности кристаллизатора жидким шла-

ком возможно прилипание к ней твердых шлаковых частичек. Это приводит к налипанию частичек шлака на стенки кристаллизатора в верхней его части. Соответственно, в этом случае будет деформироваться и искажаться поверхность заготовки, а некоторые твердые частицы шлака будут внедряться в ее тело.

Поэтому на втором этапе исследований были проанализированы параметры смачивания различными расплавами (камфен, медь и ШОС) гладкой и рифленой поверхностей медных пластин, использованных при изготовлении сборного кристаллизатора (рис. 1 и 2). Для определения величины краевого угла смачивания исследуемых поверхностей расплавом камфена использовали известный метод лежащей капли [15].

Камфен, нагретый до температуры  $38^{\circ}\text{C}$ , при помощи стеклянной трубки переносился на медную подложку для формирования капли на каждом из испытуемых образцов. Однако при таком перегреве капли растекались по поверхности гладкой стенки или полностью проникали в продольные пазы. Поэтому при проведении последующих опытов капли некоторое время выдерживали в трубке для снижения температуры до значений, близких к температуре начала затвердевания ( $\sim 34 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ). Полученные на подложке капли фотографировались и определялся угол смачивания ( $\theta$ ), который образован касательными к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, имеет вершину на линии раздела трех фаз и отсчитывается в сторону жидкости (рис. 6). Количественно степень смачивания характеризуется безразмерной величиной косинуса краевого угла (угла смачивания) или просто краевым углом (углом смачивания).

Чем меньше угол  $\theta$  и, соответственно, больше  $\cos \theta$ , тем лучше смачивание. При величине  $\theta < 90^{\circ}$ , т. е. при  $\cos \theta > 0$ , поверхность считают хорошо смачиваемой данной жидкостью. Если же угол  $\theta > 90^{\circ}$ , т. е.  $\cos \theta < 0$ , то по отношению к данной жидкости поверхность смачивается плохо («не смачивается»).

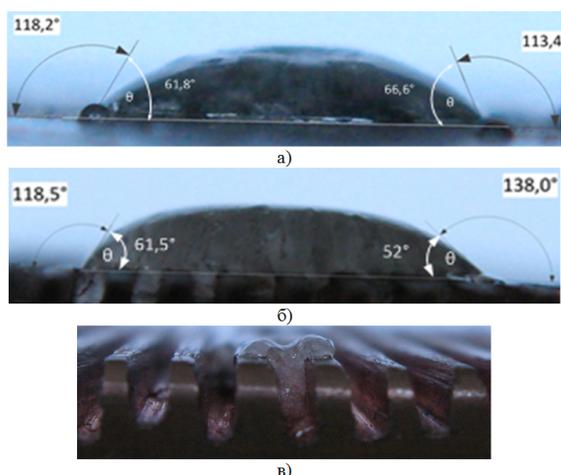


Рисунок 6 Характер смачивания камфеном гладкой поверхности медной пластины (а), шероховатой с узкими (б) и широкими (в) пазами

Однако необходимо отметить, что рассмотренные выше закономерности смачивания выполняются для всех жидких поверхностей и только на идеально гладких поверхностях твердых тел. Это обусловлено тем, что на поверхностях реальных твердых тел всегда имеются шероховатости, неоднородности, поры, трещины и т. д. Площадь шероховатой поверхности ( $S_{\text{ш}}$ ) всегда больше, чем площадь гладкой подложки ( $S_0$ ). Отношение  $S_{\text{ш}}/S_0 = K$  называют коэффициентом шероховатости.

Влияние шероховатости на краевой угол описывается уравнением Венцеля-Дерягина:

$$\cos \theta_{\text{ш}} = K \cos \theta.$$

Из приведенного уравнения следует, что для смачивающих жидкостей ( $\theta < 90^{\circ}$ ,  $\cos \theta > 0$ ) шероховатость приводит к уменьшению краевых углов ( $\cos \theta_{\text{ш}} > \cos \theta$ ). В случае несмачивания ( $\theta > 90^{\circ}$ ,  $\cos \theta < 0$ ) шероховатость вызывает увеличение краевых углов ( $\cos \theta_{\text{ш}} < \cos \theta$ ). Таким образом, на гидрофильных поверхностях шероховатость улучшает смачивание, на гидрофобных – ухудшает. Как видно из рисунка 6, камфен достаточно хорошо смачивает поверхность экспериментальных образцов. Краевой угол смачивания камфеном гладкой мед-

ной поверхности больше, чем шероховатой поверхности с узкими пазами, что соответствует приведенным выше выводам об улучшении смачиваемости поверхности, имеющей большую шероховатость, при остром краевом угле. Для пластины с широкими пазами не удалось вычислить краевой угол смачивания из-за полного затекания камфена в пазы.

Результаты исследования смачивания различных подложек медью и ШОС представлены на рисунке 7 и свидетельствуют о том, что наибольшее значение величины краевого угла характерно для капель меди и ШОС на поверхности медных пластин с узкими пазами. Примерные значения площадей поверхности экспериментальных подложек составляют  $0,004 \text{ м}^2$  для гладкой поверхности,  $0,01 \text{ м}^2$  и  $0,016 \text{ м}^2$  — для пластин с широкими и узкими пазами соответственно. Поэтому шероховатость поверхности узких пластин будет больше, чем гладкой поверхности и пластин с широкими пазами, а значит, будет способствовать ухудшению смачивания ввиду того, что величина  $\theta > 90^\circ$ .

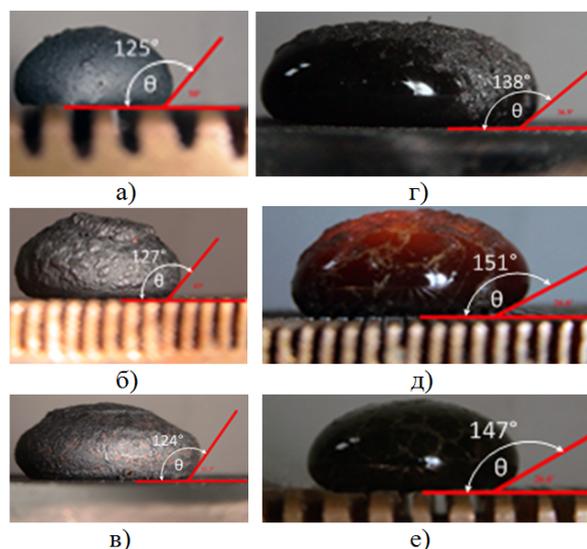


Рисунок 7 Характер смачивания медью и ШОС гладкой поверхности медной пластины (а, г), шероховатой с узкими (б, д) и широкими (в, е) пазами

На основании полученного результата можно предположить, что аналогичный

эффект будет иметь место и при смачивании шероховатых медных поверхностей кристаллизатора МНЛЗ жидкой сталью и находящейся на ее поверхности жидкой прослойкой ШОС.

Определение краевого угла смачивания медной капли и капли ШОС для каждого из образцов проводилось не менее трех раз. Усредненные данные, полученные в ходе проведенных экспериментов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения краевых углов смачивания, полученных при проведении экспериментов

Характеристика		Краевой угол смачивания, град.
смачивающей жидкости	поверхности подложки	
медь	гладкая	125
медь	узкие пазы	127
медь	широкие пазы	124
ШОС	гладкая	138
ШОС	узкие пазы	151
ШОС	широкие пазы	147

Кроме того, после кристаллизации расплава на подложке проводилась визуальная оценка качества поверхности капли, прилегающей к поверхности подложки, при нанесении меди на гладкую пластину (рис. 8, а), пластину с узкими (рис. 8, б) и широкими пазами (рис. 8, в).

Анализ данных рисунка 8,а свидетельствует о том, что поверхность капли, прилегающей к гладкой подложке, не имеет каких-либо шероховатостей или видимых пятен контакта с испытуемым образцом.

При визуальном осмотре поверхности капли, прилегающей к подложке с узкими пазами (рис. 8, б), наблюдаются отчетливые пятна контакта между каплей металла и испытуемым образцом. Для случая использования пластин с широкими пазами на поверхности капли, прилегающей к подложке, имеются грубые наплывы – следы затекания металла глубиной до 3 мм, обусловленные капиллярным эффектом (рис. 8, в).

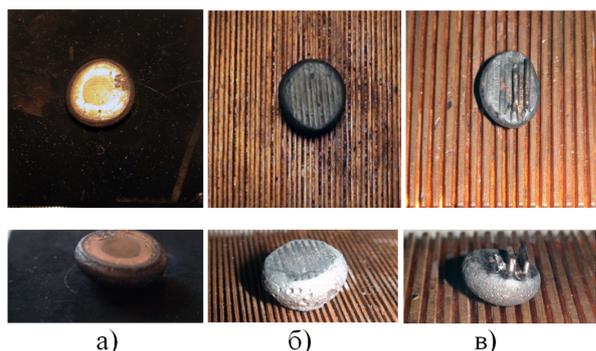


Рисунок 8 Состояние контактной поверхности каплеи меди, затвердевших на гладкой медной пластине (а), шероховатой с узкими (б) и широкими (в) пазами

На основании полученных результатов для уменьшения теплопередачи в районе жидкого мениска кристаллизующейся стали, снижения смачиваемости поверхности тепловода жидкой сталью и ШОС, уменьшения глубины следов качания, а также облегчения проникновения каплеи ШОС в зазор между поверхностями заготовки и кристаллизатора была предложена новая его конструкция [16]. Основное отличие нового кристаллизатора от традиционно используемых аналогов заключалось в наличии вертикальных пазов в районе формирования жидкого мениска. Пазы имели определенные размеры и располагались в средней части рабочей поверхности стенок кристаллизатора с целью повышения их шероховатости и образования искусственного воздушного зазора на этом участке, что ухудшает смачиваемость рабочей поверхности сталью и ШОС, а также обеспечивает дополнительное сопротивление теплоотводу от кристаллизующейся корочки заготовки (рис. 9).

Кристаллизатор содержит медные водоохлаждаемые стенки 1, на внутренней поверхности средней части которых выполнены вертикальные пазы 2 величиной  $0,6-0,8$  от их ширины ( $b$ ), глубиной ( $d$ )  $2-3$  мм на расстоянии  $0,05$  высоты кристаллизатора от номинального уровня налива в нем металла 3 длиной  $0,08-0,13$  от общей высоты ( $H$ ) кристаллизатора.

Ширина пазов ( $h$ ) составляет  $0,3-0,5$  мм, а шаг между ними равняется  $3-5$  значениям их ширины. В контакте с медной стенкой находится мениск жидкого металла 4, в районе и ниже которого образуется корка кристаллизующегося металла 5.

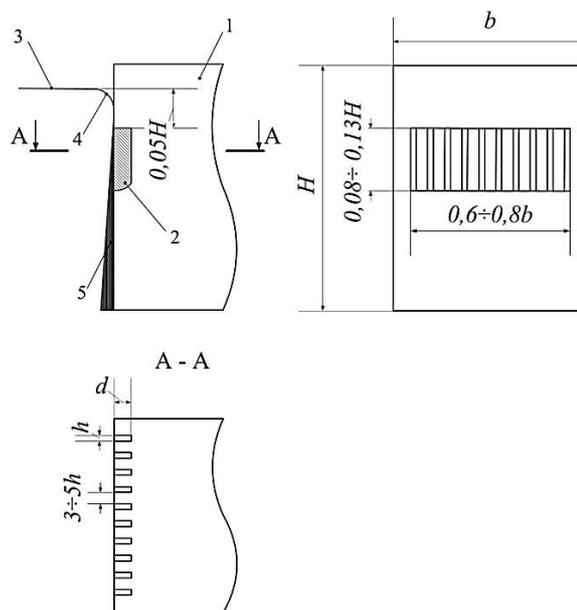


Рисунок 9 Усовершенствованная схема верхней части кристаллизатора

На мениске жидкого металла в кристаллизаторе находится ШОС, толщина жидкой прослойки которой составляет  $7-10$  мм при разливке со скоростями до  $1$  м/мин и  $15-20$  мм при разливке на высокоскоростных МНЛЗ [17]. Поэтому для предотвращения затекания ШОС в вертикальные пазы 2 последние выполняются на расстоянии  $45-60$  мм ( $\sim 0,05$  высоты кристаллизатора) от номинального уровня налива металла. Пазы выполнены не по всей поверхности стенок, а только на  $0,6-0,8$  ширины их средней части. Это обусловлено тем, что в углах заготовки в результате ее усадки и быстрого «отхода» твердой корочки от стенки кристаллизатора интенсивность отвода тепла заметно ниже, чем в ее центральной части. Выполнение пазов длиной  $70-140$  мм ( $0,08-0,13$  высоты кристаллизатора) позволяет снизить теплоотвод от корки заготовки на начальной стадии кристаллизации и предотвратить ее за-

твердевание на мениске жидкого металла. Объясняется это тем, что снижение величины теплоотвода целесообразно лишь на начальных стадиях кристаллизации заготовки, в ином случае увеличение длины пазов приведет к формированию недостаточной толщины корки на выходе из кристаллизатора, что может быть причиной прорыва металла. Причем результаты, полученные авторами работ [7, 18], свидетельствуют о том, что максимальные значения величины теплоотвода от корки металла, независимо от скорости разливки, наблюдаются в зоне контактного теплообмена на расстоянии 80–140 мм ниже мениска и отличаются только абсолютными значениями (рис. 10). Поэтому предложенное место расположения пазов и их протяженность с определенным запасом соответствуют зоне максимального теплоотвода в кристаллизаторе.

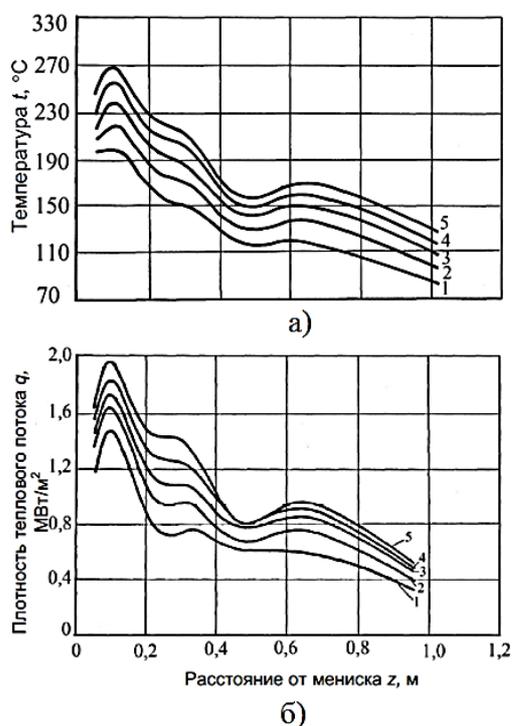


Рисунок 10 Распределение температуры поверхности широкой грани сляба (а) и плотности теплового потока широкой стенки кристаллизатора (б) по их высоте на расстоянии 0,16 м от центра при скорости разливки: 1 — 0,4 м/мин; 2 — 0,6 м/мин; 3 — 0,8 м/мин; 4 — 1,0 м/мин; 5 — 1,2 м/мин

При работе предложенного кристаллизатора расплавленный металл, соприкасаясь с медной водоохлаждаемой стенкой, начинает кристаллизоваться. Наличие пазов на стенке глубиной 2–3 мм, шириной 0,3–0,5 мм и шагом между пазами, равным 3–5 значениям ширины пазов, позволяет уменьшить площадь контакта затвердевающей корки со стенкой кристаллизатора. При этом в пазах сохраняется воздушный зазор, который выступает как дополнительное сопротивление теплоотводу, так как металл в результате действия сил поверхностного натяжения не заполняет пазы. Величина теплоотвода снижается на 15–20 %. Поэтому применение кристаллизатора с рифлеными стенками позволяет значительно улучшить качество непрерывнолитых заготовок за счет минимизации образования дефектов на начальной стадии затвердевания и улучшения качества поверхности.

В качестве основных выводов по представленной работе можно отметить следующее:

- следы качания на поверхности непрерывнолитой заготовки оказывают большое влияние на ее качество. Глубокие следы качания являются концентраторами напряжений, снижают прочность металла, могут перерастать в поперечные трещины, а также снижают выход годного;

- полученные с использованием физического моделирования результаты свидетельствуют о целесообразности изготовления в верхней части рабочей поверхности медных стенок кристаллизатора прямоугольных пазов. Наличие пазов обеспечит снижение теплоотвода в районе жидкого мениска, а также смачиваемость стенок жидкой сталью и ШОС. При уменьшении плотности теплового потока в районе жидкого мениска образуются менее грубые следы качания, что благоприятно влияет на улучшение качества поверхности и подповерхностной зоны непрерывнолитого слитка. Снижение смачиваемости стенок кристаллизатора жидкой сталью также способствует уменьшению теплоотвода и

обеспечивает более благоприятные условия для затекания жидкой ШОС в зазор между охлаждающей поверхностью и формирующейся оболочкой слитка;

– для решения поставленных в работе задач предложена новая конструкция кристаллизатора с прямоугольными пазами, выполненными на площади 0,6–0,8 ширины его средней части на расстоянии 0,05 и длиной 0,08–0,13 высоты кристаллизатора, глу-

биной 2–3 мм, шириной 0,3–0,5 мм и шагом между пазами, равным 3–5 значениям их ширины.

В ходе дальнейшей работы предполагается исследовать влияние прогрева стенки кристаллизатора в области контактного теплообмена на процесс формирования следов качания, их размеры и глубину проникновения в тело непрерывнолитой заготовки.

### Библиографический список

1. Смирнов, А. Н. Анализ механизмов формирования следов качания непрерывнолитой заготовки [Текст] / А. Н. Смирнов и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Металургія». — Донецьк : ДонГТУ, 2012. — №1(14)–2(15). — С. 201–212.
2. Смірнов, О. М. Вплив слідів хитання і режимів осциляції кристалізатора на якість поверхні безперервнолитих заготовок [Текст] / О. М. Смірнов та ін. // Металознавство та обробка металів. — 2015. — № 3. — С. 8–16.
3. Смирнов, А. Н. Моделирование условий образования следов качания на поверхности непрерывнолитого слитка [Текст] / А. Н. Смирнов и др. // Процессы литья. — 2015. — № 3. — С. 3–9.
4. Куберский, С. В. Развитие представлений о формировании следов качания и их влиянии на качество непрерывнолитой заготовки [Текст] / С. В. Куберский // Новшества в области технических наук : сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. — Тюмень, 2016. — № 1. — С. 17–26.
5. Смирнов, А. Н. Исследование особенностей формирования следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. В. Головчанский // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». — 2015. — № 11. — С. 26–30.
6. Смирнов, А. Н. Исследование особенностей формирования следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки [Текст] / А. Н. Смирнов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. — 2016. — Том 59. — № 4. — С. 226–231.
7. Паршин, В. М. Непрерывная разливка стали [Текст] / В. М. Паршин, Л. В. Буланов. — Липецк : ОАО «НЛМК», 2011. — 221 с.
8. Кац, А. М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов [Текст] / А. М. Кац, А. Г. Шадек. — М. : Металлургия, 1983. — 208 с.
9. Либерман, А. Л. Управление теплоотводом в кристаллизаторе – путь улучшения качества непрерывнолитых заготовок [Текст] / А. Л. Либерман // И. П. Бардин и отечественная металлургия. — М. : Наука, 1983. — С. 112–120.
10. А.с. (СССР) 338040, МПК В 22 D 11/04. Кристаллизатор для установок непрерывной разливки металлов с волнистыми стенками / М. Я. Бровман и др. — № 1621973/22-2 ; заявл. 06.02.71 ; опубл. 23.08.86. Бюл. № 31. — 2 с. : ил.
11. Кац, А. М. Анализ деформации рабочих стенок кристаллизатора [Текст] / А. М. Кац // Цветные металлы. — 1983. — № 12. — С. 55–58.
12. Валуев, Д. В. Непрерывная разливка стали и сплавов [Текст] : учебное пособие / Д. В. Валуев, Н. А. Козырев, Р. А. Гизатулин. Юргинский технологический институт. — Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 406 с.
13. Neumann, F. Mold fluxes in high speed thin slab casting / F. Neumann, J. Neal, M.A. Pedroza e.a. // Proc. 79th Steelmaking Conf. — Pittsburgh : Iron and Steel Society. — 1996. — P. 249–257.
14. Emi, M. The mechanisms for sticking type break-outs and new developments in continuous casting mold fluxes / M. Emi // Proc. 74th Steelmaking Conf. — Washington : Iron and Steel Society, 1991. — P. 623–630.

15. Шатагин, О. А. Горизонтальное непрерывное литьё цветных металлов и сплавов [Текст] / О. А. Шатагин. – М. : Металлургия, 1974. — 210 с.
16. Патент на корисну модель 98151 Україна, МПК В 22 D 11/00. Кристалізатор машини безперервного (напівбезперервного) лиття заготовок / О. М. Смірнов та ін.; заявник і власник Донбас. державн. техн. ун-т. — № и 2014 07307; заявл. 01.07.14; опубл. 27.04.15. Бюл. № 8. — 3 с. : іл.
17. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали [Текст] : учебник / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.
18. Смирнов, А. Н. Процессы непрерывной разливки [Текст] / А. Н. Смирнов и др. — Донецк : ДонНТУ, 2002. — С. 536.

© Куберский С. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., старшим мастером ОНРС ККЦ ПАО «АМК» Максаевым Е. Н.*

*Статья поступила в редакцию 06.12.17.*

**к.т.н. Куберський С. В.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### **УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КРИСТАЛІЗАТОРА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ І ПІДПОВЕРХНЕВОЇ ЗОНИ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ЗАГОТОВОК**

*Показано вплив слідів хитання на поверхні безперервнолитої заготовки на її якість і вихід придатного металу. З використанням фізичного моделювання досліджено вплив рельєфної поверхні мідних підкладок на інтенсивність тепловідведення та їх змочування різними розплавами. Встановлено позитивний вплив на зменшення глибини слідів хитання зниження щільності теплового потоку в районі рідкого меніску, а також змочування стінок кристалізатора розплавами сталі і ШУС. Запропоновано нову конструкцію кристалізатора з прямокутними пазами у верхній частині його робочої поверхні. Обґрунтовано розміри і крок пазів, а також місце їх розташування і займану площу.*

**Ключові слова:** безперервне розливання, кристалізатор, хитання, сліди, гребінці, якість, поверхня, шорсткість, тепловідведення, меніск, змочування, затікання.

**PhD Kuberskiy S. V.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

#### **IMPROVEMENT OF CRYSTALLIZER'S DESIGN FOR IMPROVING SURFACE QUALITY AND SUBSURFACE ZONE OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS**

*It is shown an influence of the rocking marks on the surface of a continuously cast billet on its quality and the yield of useful metal. Using the physical simulation, the effect of the textured surface of copper substrates on the intensity of the heat removal and substrates wetting by various melts is investigated. A positive effect was found from decreasing the density of the heat flux in the zone of the liquid meniscus on the decrease of depth of rocking traces, as well as the wettability of the crystallizer's walls by the melts of steel and the SCO. A new design of a mold with rectangular grooves in the upper part of its working surface is proposed. The dimensions and pitch of the grooves, as well as their location and the area occupied, are justified.*

**Key words:** continuous casting, crystallizer (mold), rocking, traces, scallops, quality, surface, roughness, heat removal, meniscus, wetting, wicking.