

УДК 621.771

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Анна Алексеевна Солякова

*Студентка 4 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: П.Ю. Жихарев,
ассистент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»,
старший научный сотрудник ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»*

Для того чтобы улучшить условия первичной кристаллизации стали необходимо совершенствовать конструкции и режим работы кристаллизатора путем оптимизации тепловой работы кристаллизатора, выбором материала стенок, а также применением макрохолодильников и ультразвука.

1. Анализ тепловой работы кристаллизатора.

Расчеты показывают, что общее количество тепла, отводящееся через внешний стальной корпус, незначительно по сравнению с тепловым потоком, которое отводится с охлаждающей водой (примерно 0,02-0,05%) и средняя температура внешнего корпуса почти не отличается от температуры окружающей среды.

Рассмотрим распределение локальной плотности теплового потока по длине рабочей стенке кристаллизатора в зависимости от скорости разливки.

$$q = \Delta q \cdot e^{-k \frac{S}{V}} + q_{min} ,$$

где

V- скорость разливки;

q_{min} – величина теплового потока внизу кристаллизатора (500-800 кВт/м²);

k- коэффициент определяемый опытным путем (~1,5 ... 4 мин⁻¹)

Δq - перепад теплового потока по высоте, который выражается через среднюю величину теплового потока в кристаллизаторе

$$\bar{q} = \frac{\Delta T \cdot C \cdot Q \cdot \rho}{S \cdot L}$$

где ΔT – нагрев воды,

C - теплоемкость воды,

Q- расход воды на кристаллизатор,

ρ – плотность воды,

S – периметр разливаемого сечения,

L – длина кристаллизатора.

На следующих изображениях представлены результаты анализа теплового состояния кристаллизатора со сверленными каналами и петлевой системы охлаждения. При этом стоит отметить, что «относительная температура» - отношение реальной температуры к температуре разупрочнения материала стенки, «средние» условия обмена соответствуют однократному использованию воды и средним скоростям

течения воды в каналах, «наихудшие»-связаны с минимальной скоростью течения воды в канале и с максимальной температурой охлаждающей воды при ее повторном использовании в петлеобразной схеме охлаждения.

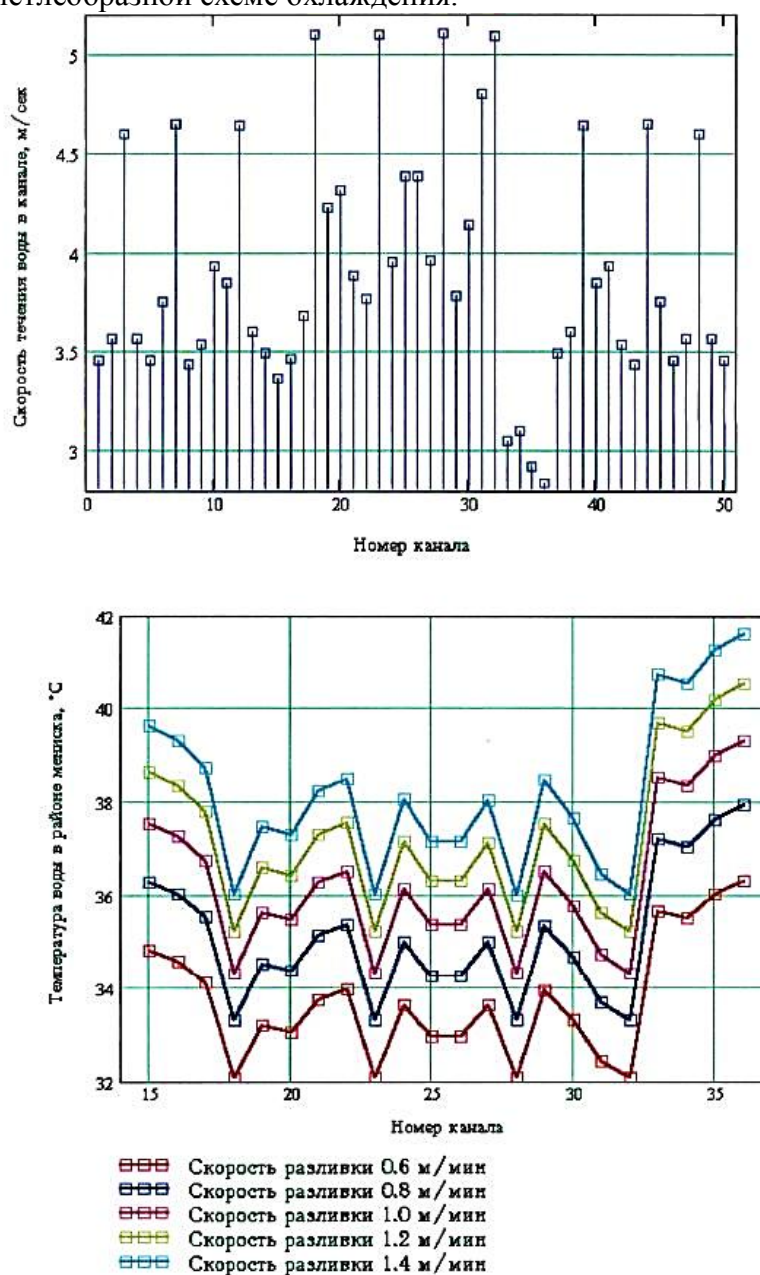


Рис. 1. Скорость и температура воды в каналах

Рис. 1 показывает неравномерность реальных условий теплообмена от канала к каналу для петлеобразной схемы охлаждения кристаллизатора со сверлеными отверстиями.

На рис.2 видим, что увеличение температуры стенки для кристаллизатора со сверлеными каналами происходит из-за повторного использования охлаждающей воды и большого разброса скорости течения воды по каналам ,возникающего из-за больших гидродинамических сопротивлений элементов петлеобразной схемы охлаждения.

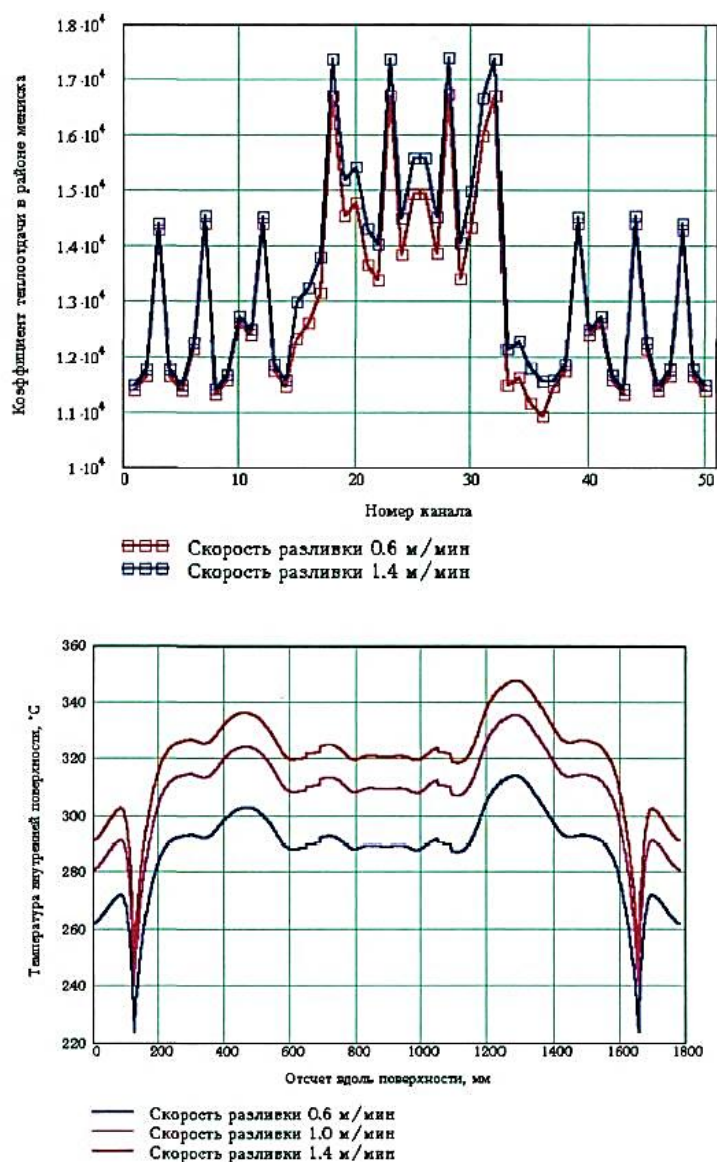


Рис. 2. Температурное состояние рабочей поверхности широкой грани кристаллизатора

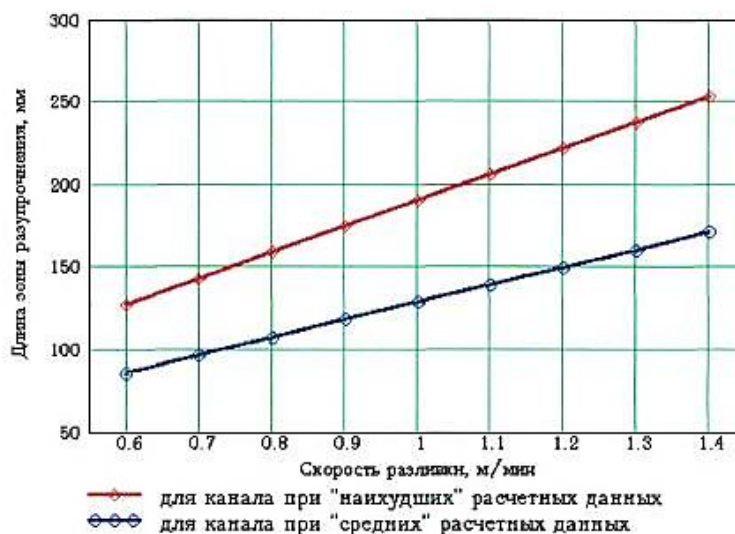


Рис.3 . Длина зоны (отсчитывается от мениска) разупрочнения материала стенки кристаллизатора со сверлеными каналами для «средних» и «наихудших» условий.

На рис.3 видно, что для «наихудших» условий происходит местный перегрев стенки кристаллизатора.

Из выше написанного можно сделать вывод, что при высоких скоростях разлива в рабочем слое стенки кристаллизатора (10-15мм) со сверлеными каналами образуется зона разупрочнения материала. Из-за этого происходит резкое снижение износостойкости поверхностного слоя стенки, а также отслаивание и прилипание меди к поверхности непрерывнолитого слитка, что вызывает появления «паукообразных» трещин.

Для решения данной проблемы предложена конструкция тонкостенного кристаллизатора со щелевыми фрезерованными каналами и прямоточным охлаждением каждой грани в отдельности. А также, рекомендуется использовать холоднокатаную медь марки Мср с более высокой температурой разупрочнения - 350°C, чтобы отсутствовала зона разупрочнения при щелевых каналах.

Таким образом, было доказано, что с точки зрения тепловой работы конструкция кристаллизатора со щелевыми каналами более эффективная по сравнению со сверлеными каналами. Также, более равномерный теплоотвод от слитка к стенке кристаллизатора можно добиться при применении щелевого кристаллизатора с однократным использованием воды.

2. Влияние износостойкого покрытия внутренних стенок кристаллизатора на его тепловую работу.

Повысить качество поверхности непрерывнолитой заготовки можно с помощью покрытия медных плит кристаллизатора тонким слоем никеля.

На величину теплового потока в системе слиток-кристаллизатор основное влияние оказывает участок между заготовкой и рабочей поверхностью стенок кристаллизатора, т.к. обладает максимальным термическим сопротивлением (доля этого сопротивления $\approx 0,75 - 0,85$).

При изменении общего термического сопротивления новое значение теплового потока можно вычислить:

$$\tilde{q} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} q$$

где R_{Σ} - общее термическое сопротивление в области мениска,
 \widetilde{R}_{Σ} - общее термическое сопротивление, соответствующее новому значению теплового потока \tilde{q} ,

q - величина теплового потока при общем термическом сопротивлении R_{Σ} ,

Рассмотрим влияние никелевого покрытия на величину теплового потока в области мениска. Для расчетов возьмем следующие данные:

$h=1$ мм (толщина никелевого покрытия в области мениска);

$\lambda_{Ni}=92$ Вт/м·К (коэффициент теплопроводности никеля);

Т.к. тепловые потоки вдоль рабочей поверхности стенки кристаллизатора малы по сравнению с потоками направленными перпендикулярно рабочей поверхности, то ими можно пренебречь. Тогда максимальную температуру в никелевом покрытии можно оценить по упрощенной формуле исходя из одномерной задачи теплопроводности стенки :

$$T_{Ni} = \Delta T + T_{Cu} ;$$

$$\Delta T = \frac{q \cdot h}{\lambda_{Ni}} ;$$

где q - тепловой поток,

h -толщина покрытия,

λ_{Ni} - теплопроводность никеля,

T_{Cu} - температура меди в месте контакта с никелем покрытием.

Подставляя в формулу значения, получим ,что при $q=2,2$ МВт/м²·К - $\Delta T=23,9^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи для никелевого покрытия в области мениска найдем по следующей формуле:

$$\alpha_{Ni} = \frac{\lambda_{Ni}}{h} = 92 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \text{К}.$$

Т.е. термическое сопротивление покрытия мало влияет на величину теплового потока от жидкого металла к охлаждающей воде, т.к. доля термического сопротивления никелевого покрытия от общего составляет не более 1,5%. Несмотря на это, следует учесть, что покрытие влияет на величину термического сопротивления участка от поверхности слитка к стенке кристаллизатора R_3 .

Представим общее термическое сопротивление как сумму :

$$R_{\Sigma} = R_0 + R_3 ;$$

Тогда

$$\tilde{q} = \frac{R_{\Sigma}}{\widetilde{R}_{\Sigma}} q = \frac{R_3 + R_0}{R_3 + R_0} q = \frac{1}{1 + K_1 \left(\frac{R_3}{R_0} - 1 \right)} q$$

где $K_1 = \frac{R_3}{R_0}$,

Коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка к стенке кристаллизатора можно представить:

$$\alpha = \varphi \cdot \alpha_{\text{конт}} + (1 - \varphi) \left[\alpha_{\text{изл}} + \frac{\lambda_3}{\delta_3} \right]$$

где φ - относительная площадь контакта,

$\alpha_{\text{конт}}$ – коэффициент теплоотдачи через контакт,
 $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением,
 λ_3 – теплопроводность среды в зазоре между поверхностью слитка и стенки кристаллизатора,
 δ_3 – величина зазора между поверхностью слитка и стенкой кристаллизатора.

$$\alpha_{\text{конт}} = 2,1 \cdot 10^4 \frac{p \cdot \bar{\lambda}}{3\sigma_B},$$

где σ_B – предел прочности менее пластичного материала соприкасающихся поверхностей,

p – давление (в данном случае рассматривается только действие внешнего ферростатического давления),

$$\bar{\lambda} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2} \text{ – приведенный коэффициент теплопроводности}$$

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности контактирующих тел (слиток и стенки кристаллизатора)

Коэффициенты теплопроводности :

сталь - 28 Вт/м·К,

медь - 349 Вт/м·К

никель 92 Вт/м·К.

В результате найдем приведенные коэффициенты теплопроводности :

для медной стенки без покрытия 0 58 Вт/м·К.,

для медной стенки с никелевым покрытием 43 Вт/м·К.

Изменение термического сопротивления участка от поверхности слитка к стенке кристаллизатора

$$\frac{\bar{R}_3}{R_3} = \frac{\alpha}{\tilde{\alpha}} = \frac{\alpha_0 + \varphi\alpha_{\text{конт}}}{\alpha_0 + \varphi\tilde{\alpha}_{\text{конт}}} = \frac{1}{1 - K_2 \left(1 - \frac{\lambda_{\text{покр.}}}{\lambda_0}\right)},$$

где $K_2 = \frac{\varphi\alpha_{\text{конт}}}{\alpha}$ – доля тепла, которая передается через контакт, от общего теплового потока.

$K_2 = 0,85..0,9$ (с Ni покрытием),

$\lambda_{\text{покр.}}, \lambda_0$ – приведенные коэффициенты теплопроводности с покрытием и без него.

Соединяя все формулы в одну, получаем величину теплового потока в кристаллизаторе с покрытием :

$$\tilde{q} = \frac{1 - K_2 \left(1 - \frac{\lambda_{\text{покр.}}}{\lambda_0}\right)}{1 - (1 - K_1)K_2 \left(1 - \frac{\lambda_{\text{покр.}}}{\lambda_0}\right)} q;$$

Тогда $\tilde{q} \approx 0,8..0,82q$

Следовательно, для стенок с покрытием никеля величина теплового потока в области мениска уменьшится и будет порядка $q = 1,7...1,8$ МВт/м². (без покрытия $q = 2,2$ МВт/м²). Результаты приведены на рис. 4-5

Таким образом, мы доказали, что использование никелевого покрытия позволяет снизить температуру меди на уровне мениска на 42°С, за счет снижения величины теплового потока.

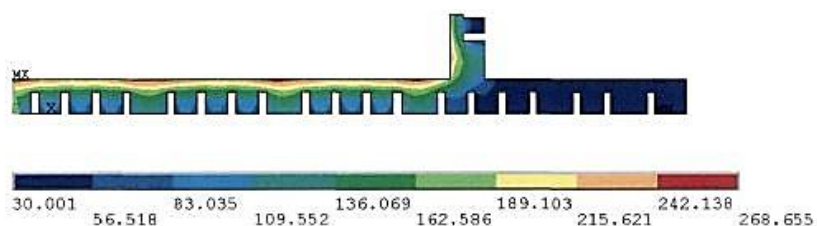


Рис.4 Температура в стенках кристаллизатора без покрытия на уровне мениска при разливке сечения 150x1000мм²

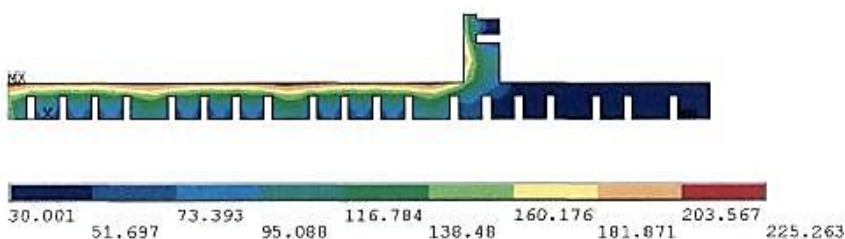


Рис.5 Температура в стенках кристаллизатора с покрытием на уровне мениска при разливке сечения 150x1000мм²

3. Применение макрохолодильников

В последнее время была предпринята попытка повлиять на условия кристаллизации непрерывной заготовки за счёт ввода в нее расплавляющихся макрохолодильников, что способствует улучшению качества заготовки.



ОАО ММЗ «Серп и Молот»



ОАО «ММК»

Рис.6. Процесс ввода макрохолодильника в кристаллизатор.

Была исследована и разработана технология внешнего воздействия на расплав в кристаллизаторе МНЛЗ расходуемых макрохолодильников (стальная лента). Оценку поведения макрохолодильника в расплаве и его влияние на процесс теплопереноса провели с использованием метода математического моделирования. Для построения математической модели было принято, что температурное поле расплава в кристаллизаторе МНЛЗ квазистационарно и отсутствует диссипация энергии в направлении, совпадающем с направлением вытягивания слитка. Теплообмен описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \rho(\partial w / \partial t + v_1 \partial w / \partial z) = \text{div}(\lambda \nabla T), & \Gamma \in \Gamma_1, \\ \rho_{\text{лн}}(\partial w / \partial t + v_2 \partial w / \partial z) = \text{div}(\lambda \nabla T), & \Gamma \in \Gamma_2, \end{cases}$$

где v_1 – скорость вытягивания сляба;
 v_2 – скорость подачи ленты;
 $w=c(T)+\chi n(T)$ – энтальпия;
 $\rho_{лн}$ – плотность материала ленты;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 t – время;
 $n(T)$ – функция, характеризующая долю жидкого металла в области двухфазного состояния;
 $c(T)$ – теплоемкость;
 Γ – область расчета.

Граничные условия:

$$x = 0: \quad -\lambda \partial T / \partial x = 0;$$

$$x = x_{сл}: \quad -\lambda \partial T / \partial x = \alpha (T - T_{H_2O});$$

$$y = 0: \quad -\lambda \partial T / \partial y = 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq x \leq x_{лн1} \quad \text{и} \quad x_{лн2} \leq x \leq x_{сл};$$

$$\lambda \partial T / \partial y = (v_2/v_1) \rho_{лн} y_{лн} (\partial w / \partial t) \quad \text{при} \quad x_{лн1} \leq x \leq x_{лн2};$$

$$-\lambda \partial T / \partial y = 0 \quad \text{при} \quad x_{лн1} > x \text{ и} \quad x > x_{лн2};$$

$$y = y_{сл}: \quad -\lambda \partial T / \partial y = \alpha (T - T_{H_2O}).$$

Для численной реализации модели использовали разностную схему сквозного счета. Вывод результатов расчета представляет собой поле температур и его изолинии в заданный момент времени.

На рис. 7 представлено температурное поле непрерывнолитого сляба с вводом ленты ($v_{лн}=2$ м/мин) при скорости разливки $v_p=0,7$ м/мин. Лента расплавляется в кристаллизаторе на расстоянии около 500 мм от мениска. При этом изменяется общий объем двухфазной зоны в сторону ее расширения. При вводе со скоростью 6 м/мин лента полностью не расплавляется и замораживается в матричный металл в области твердо-жидкого состояния и фактически армирует матричный расплав.

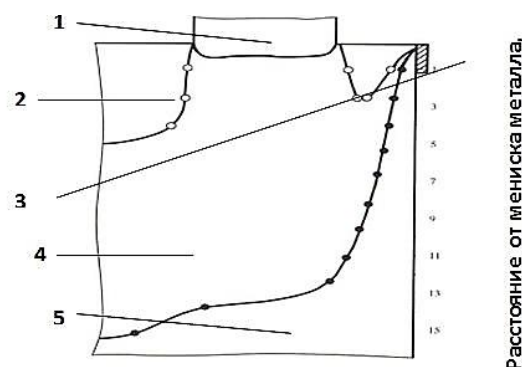


Рис. 7. Температурное поле сляба, отлитого с вводом ленты: 1 – лента; 2 – жидкая фаза; 3 – кристаллизатор; 4 – двухфазная зона; 5 – твердая фаза

Для уточнения параметров процесса взаимодействия ленты с расплавом провели эксперименты по определению динамики намораживания и плавления лент. При исследовании учитывали исходную толщину и химический состав вводимой ленты, перегрев металла выше температуры ликвидус на выходе из погружаемого

стакана в кристаллизаторе. Образцы стальных лент опускали в жидкий металл на заданное время в определенном заранее месте на фиксированную глубину. Характер изменения толщины замороженной оболочки и остаточной толщины лент во времени при различном перегреве показан на рис. 8.

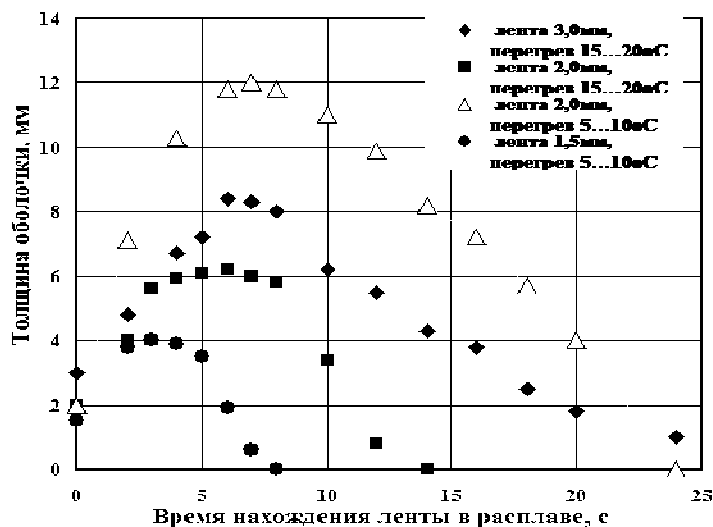


Рис. 8 Динамика изменения толщины оболочки в расплаве

Отмечено, что максимальная толщина замороженного слоя для лент толщиной 1,5 мм достигается через 2...3 с, для лент толщиной 2,2 мм – через 5...6 с, толщиной 3,0 мм – через 6...8 с. Максимальная суммарная толщина ленты и замороженной оболочки при толщине ленты 3 мм составила 8,4...9,0 мм, при толщине 1,5 мм – 3,5...3,9 мм. При снижении величины перегрева с 15...20 °С до 5...10 °С время намораживания ленты увеличивается в 1,2...1,4 раза, толщина замороженного слоя в 1,9...2,2 раза, время полного расплавления в 2,0 раза. Для лент малых толщин характерно чрезвычайно быстрое протекание процессов намораживания и плавления. Полное расплавление внесенной твердой фазы достигается в течение 3...4 с.

Задачей гидравлического моделирования явилось выяснение влияния макрохолодильников на характер циркуляции потоков металла в кристаллизаторе в зависимости от размеров, места и глубины погружения холодильников. Для получения в модели движения жидкости, подобного движению расплавленной стали, необходимо геометрическое подобие модели и природы, условий движения жидкости, физических параметров в сходных точках модели и природы, одинаковые значения определяющих критериев. Из условий равенства критериев Рейнольдса, Вебера и Фруда с учетом свойств жидкости в модели и натуре определяли линейный масштаб, масштабы скорости, расхода и вязкости моделирующей жидкости. Для качественной и количественной оценки вынужденной циркуляции металла были использованы методы фиксирования движущейся границы подкрашенной жидкости и измерения скоростей потоков трубкой Пито. При любом удалении макрохолодильника от выходных отверстий погружаемого стакана при малом перекрытии сечения (1...5 мм) не наблюдается его влияния на затопленные струи стали. Воздействие проявляется при величине перекрытия струи свыше 10 мм. При расположении холодильников толщиной 2...5 мм параллельно широкой грани кристаллизатора практически не изменяется установившаяся схема циркуляции жидкой стали – вне зависимости от глубины проникновения ленты в расплав.

Измерение температуры жидкой лунки в верхней части кристаллизатора специально изготовленными блоками термопар помогло уточнить характер распределения температур в расплаве. К основным отличиям температурных полей при вводе ленты в расплав можно отнести значительное общее снижение температуры жидкой лунки при вводе в нее макрохолодильников. Жидкий металл в точках, прилегающих к холодильнику, имеет на 7...13 °С более низкую температуру по сравнению с ее значениями при разливке по обычной технологии. Отмечается более быстрое охлаждение металла по пути движения потока.

Для изучения распределения температур в затвердевающем слябе в нижней части кристаллизатора и зоне вторичного охлаждения применяли методику вмораживания блока термопар в растущую корочку сляба. Для фиксации фронта затвердевания в жидкую часть заготовки вводили индикаторы в виде радиоактивного изотопа P^{32} . Исследование процесса кристаллизации проводили по полученным радиограммам и путем расчета скоростей кристаллизации по плотности дендритной структуры. Выделены три зоны с различными соотношениями скоростей кристаллизации по малому и большому радиусам сляба. Первая зона охватывает участок от мениска металла до конца кристаллизатора. На этом участке скорость кристаллизации со стороны большого радиуса несколько выше по отношению к малому. После выхода сляба из кристаллизатора возрастает градиент температуры по малому радиусу, в то время как по большому радиусу он продолжает монотонно снижаться. В конце процесса кристаллизации скорости нивелируются с некоторым увеличением скорости кристаллизации со стороны большого радиуса за счет осевших обломков дендритов.

На рис. 9 показано влияние количества внесенной твердой фазы на изменение скорости кристаллизации сляба.

Скорость кристаллизации последовательно увеличивается при увеличении массы вводимой твердой фазы, особенно в пределах кристаллизатора. Наибольшее воздействие на скорость кристаллизации холодильники оказывают в режиме вмораживания в заготовку. Нетипичная зависимость изменения скорости кристаллизации для этого случая объясняется тем, что при вмораживании холодильника в корочку слитка образуется два фронта кристаллизации: внешний – от водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора и внутренний – от ленты, в этом случае фактически играющей роль армирующего вкладыша.

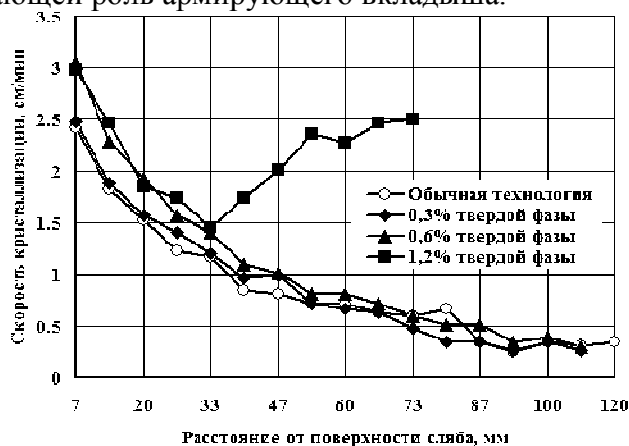


Рис.9. Изменение скорости кристаллизации со стороны малого радиуса сляба в зависимости от количества внесенной в расплав твердой фазы

Для определения влияния вводимой ленты на величину снижения перегрева и, как следствие, определения технологических параметров, обеспечивающих режим полного расплавления или режим армирования, выбрали модель с постоянной величиной перегрева стали выше температуры ликвидус в верхней части кристаллизатора. По результатам экспериментов определили зависимость скорости ввода ленты в режиме расплавления от скорости разливки и величины перегрева:

$$v = K v_p \Delta T,$$

где K – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и температуры ликвидус ленты, размеров слитка,

v_p – скорость разливки стали; Δ

T – величина перегрева расплава в ПК.

В случае применения ленты из стали Ст1сп сечением 2×300 мм коэффициент $K = 0,6$. Для слябов крупных сечений наиболее целесообразно, с точки зрения технологичности процесса, применение лент размерами 1,2...1,8×300...400 мм.

На основании разработанной математической модели затвердевания, исследования динамики процесса намораживания и расплавления твердой фазы, расчета параметров ввода стальной ленты в жидкий металл, была спроектирована и изготовлена установка для механизированного ввода стальной ленты в расплав (УМВЛ). Установка имеет собственный привод передвижения из резервной позиции в рабочую, точное позиционирование направляющей ввода ленты по отношению к большой оси кристаллизатора, систему согласования скорости ввода ленты со скоростью разливки стали. В дальнейшем установка была модернизирована путем оснащения ее специальным электромагнитным вибратором. При проведении опытных плавок было установлено, что глубина проникновения ленты в расплав снижается в 2...3 раза, что позволяет гарантированно расплавлять ее на верхних горизонтах жидкой лунки в кристаллизаторе.

При оптимально выбранных режимах ввода твердой фазы и существенном снижении перегрева в осевой зоне слябов формируется зона глобулярных кристаллов шириной от 40 до 60 мм. Для слябов, полученных по новой технологии, со стороны большого радиуса характерно либо полное отсутствие зоны направленной кристаллизации, либо ее сокращение до минимальных размеров. Наибольшее положительное воздействие макрохолодильников достигается при определенном количестве внесенной твердой фазы. В частности, для перегрева 25...30 °С эта величина составляет 0,6...0,8% массы твердой фазы от массы разливаемого металла. При увеличении перегрева и скорости разливки данная величина смещается в сторону больших величин. Максимальный эффект достигается при максимальном количестве расплавленной твердой фазы. При дальнейшем увеличении массы вводимой ленты количество расплавленной фазы и ее влияние на макроструктуру уменьшается. Это объясняется снижением числа дополнительных центров кристаллизации, образующихся при плавлении макрохолодильника. Установлено снижение дефектности макроструктуры низколегированных сталей по показателям осевой химической неоднородности с 1,21 до 0,27 балла; осевым трещинам – с 0,14 до 0; трещинам, перпендикулярным широкой грани – с 0,78 до 0,22; гнездообразным трещинам – с 0,33 до 0,05. Характерное распределение серы по толщине сляба приведено на рис. 10. Распределение остальных ликвирующих элементов (Mn, P, S и др.) носит аналогичный характер.

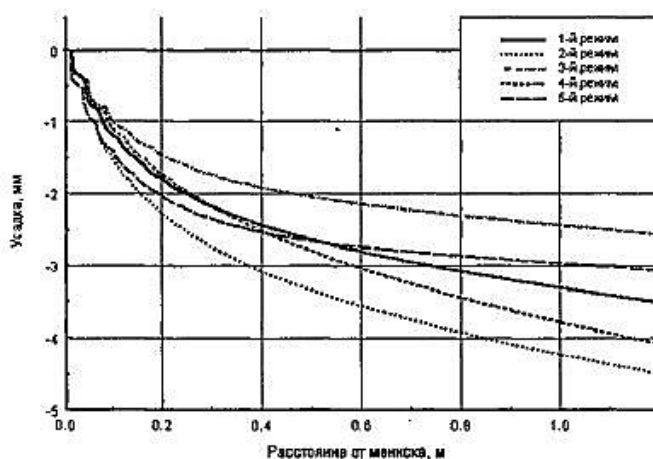


Рис. 12. Усадка для соответствующих тепловых потоков

Если изменить тепловой поток на 20%, то усадка изменяется в пределах 30%. С этим связано изменение усадки при изменении скорости разливки (Рис.13)

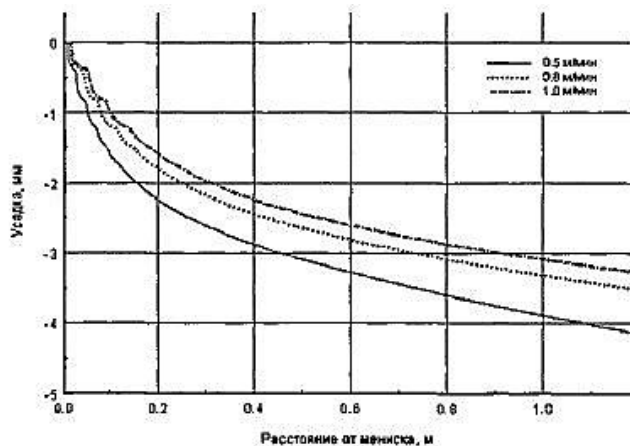


Рис. 13 Усадка в зависимости от скорости разливки.

На рис. 14 видно, что повышенный износ стенок внизу кристаллизатора связан с тем, что постоянная конусность по длине кристаллизатора плохо аппроксимирует нелинейность усадки заготовки. По опытным данным было установлено, что износ, интенсивно развиваясь вначале, стремится к определенной величине, что подтверждает предположение о том, что износ происходит из-за несоответствия усадки заготовки и конусности стенок кристаллизатора. Стенка в процессе износа приобретает форму, соответствующую усадке заготовки расчетные и опытные значения максимальной величины несоответствия усадки и конусности стенки внизу кристаллизатора.

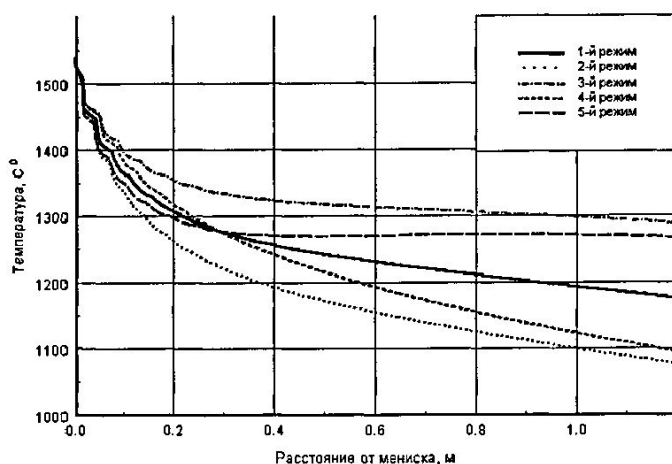


Рис.14 Усадка слитка и конусность

В таблице 1 приведены для разных сечений заготовки расчетные и опытные значения максимальной величины несоответствия усадки и конусности стенки внизу кристаллизатора.

Таблица 1. Несоответствие усадки и конусности стенки кристаллизатора

| Размер сечения | 258x1281 | 257x1354 | 257x1384 |
|----------------|----------|----------|----------|
| Расчет, мм | 1,8 | 1,9 | 2,0 |
| Опыт, мм | 1,5 | 1,8 | 1,7 |

Зона износа стенки по опытным данным достигает 400-650 мм от низа кристаллизатора, что подтверждается расчетами (Рис.14).

Исходя из кривой усадки (Рис. 14) можно предложить форму боковых стенок кристаллизатора с двойной и тройной конусностью.(Рис. 15)

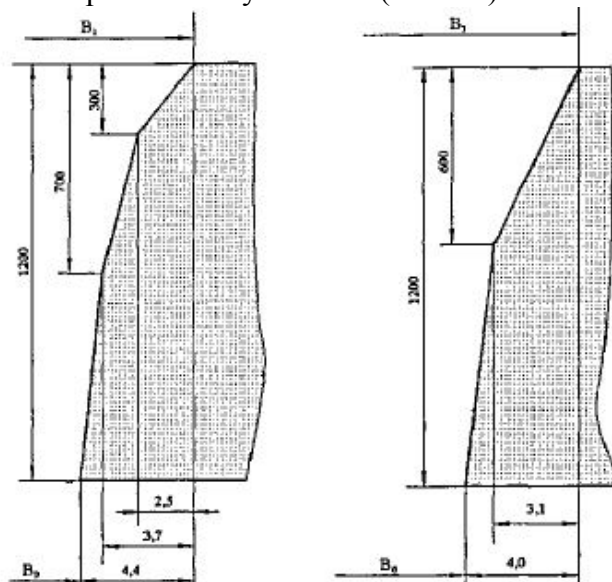


Рис.15. Рекомендуемые стенки с переменной конусностью.

Т.к. усадка пропорциональна размеру широкой стороны заготовки, при изменении размера отливаемого сечения можно использовать рекомендуемые стенки. Т.е. исходя из размера широкой стороны заготовки на выходе из кристаллизатора B_0 ,

необходимо переместить узкие стенки и повернуть их на угол, который обеспечит минимальное изменение зазора между слитком и кристаллизатором (Рис. 16, 17).

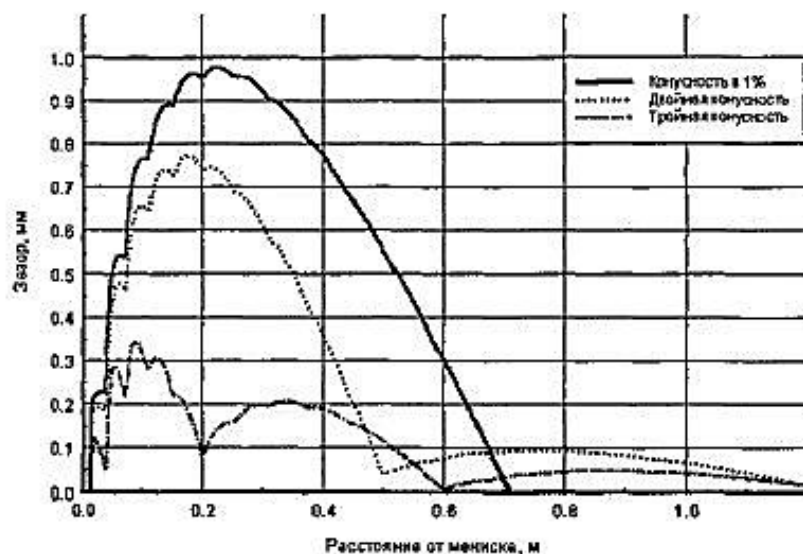


Рис. 16. Зазор между стенками и заготовкой 1000x250 мм²

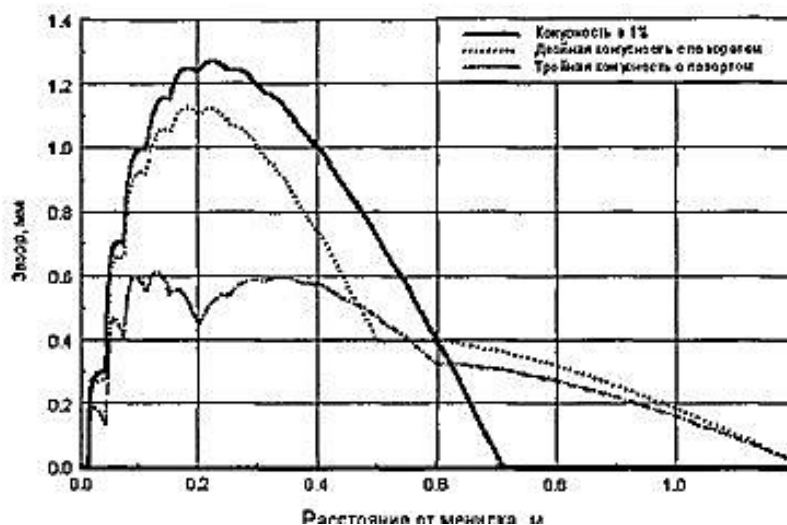


Рис. 17. Зазор между стенками и заготовкой 1300x250 мм² с учетом перемещения и поворота стенки.

Получены формулы для расчета установочной величины шириныверху кристаллизатора:

$$B_1 = B_0 + 7,53 \left(\frac{B_0}{1000} - 1 \right) + A$$

где B_1 – установочная величина шириныверху кристаллизатора

B_0 – широкая стороны заготовки на выходе из кристаллизатора

$A=8$ – для двойной конусности

$A=8,8$ для тройной конусности

На основе полученных результатов видно, что использование рекомендуемых стенок позволит снизить износ, а также увеличить срок службы стенок, улучшить теплообмен между стенками кристаллизатора и заготовкой для улучшения повышения качества поверхности.

5. Воздействие ультразвуком

Энергия ультразвука, воздействующая на расплав, меняет кинетику процесса. При воздействии ультразвуком (УЗ) наблюдается усиление перемешивания жидкой фазы, обламывание растущих кристаллов.

При использовании данной технологии можно уменьшить объем зачистки поверхности заготовок, повысить выход годного при прокате, сделать возможным разливку без качания, а также увеличить скорость разливки, сохраняя качество заготовки.

Были проведены экспериментальные плавки в кислородно-конвертерном цехе ОАО «ММК». Создана система наложения ультразвуковых колебаний на стенки кристаллизатора со следующими техническими данными:

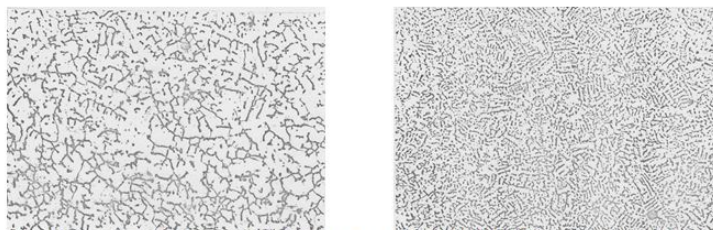
- самонастраивающиеся генераторы
- пьезокерамические излучатели
- рабочая частота колебаний 20...35 кГц
- количество излучателей – до 120 шт.
- потребляемая мощность 15 кВт



Рис. 18 Кристаллизатор со смонтированными УЗ излучателями

Применение данной системы позволило снизить количество поверхностных дефектов на 15%.

Также были произведены эксперименты на Череповецком металлургическом комбинате и на заводе «Электросталь». Результаты проведенных испытаний приведены на Рис. 19-20



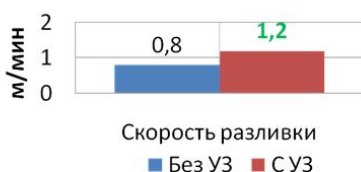
Микроструктура поверхностного слоя слэба X18N10T на глубине 5-6 мм

от поверхности: слева – без УЗ, справа – с УЗ

Рис. 19 Эксперименты по разливке с УЗ на Череповецком металлургическом комбинате

Результаты:

Влияние УЗ на скорость разливки:



- 1) При сохранении качественных показателей макроструктуры.
- 2) Снижение расходного коэффициента с 1,194 до 1,179.



Макроструктура слитка

5

Рис. 20 . Эксперименты по разливке с УЗ на заводе «Электросталь»

Также разливка слитков с использованием УЗ производилась в Японии и во Франции.

.В результате экспериментов установлено, что:

1. Скорость кристаллизации увеличивается на 20–28% за счет увеличения теплоотдачи от заготовки.
2. Размеры первичных дендритов снижаются с 5–15 мм до 1–5 мм,.
3. Уменьшается ликвация примесей, балл осевой ликвации и рыхлости, балл по трещинам и ликвационным полоскам.
4. Снижается протяженность зоны столбчатых дендритов за счет увеличения зоны неориентированных кристаллов.

В настоящее время созданы возможности для разработки технологии непрерывной разливки стали через кристаллизаторы с ультразвуковой вибрацией рабочих стенок

Выводы

1. Установлено, что тепловая работа кристаллизатора с щелевыми каналами значительно эффективнее кристаллизатора со сверленными каналами. Щелевой кристаллизатор с однократным использованием воды обеспечивает более интенсивное охлаждение по сравнению с петлевой схемой и приводит к более равномерному теплоотводу от слитка к стенке кристаллизатора.

2. Исследовано влияние никелевого покрытия внутренних стенок кристаллизатора на его тепловую работу. Установлено, что величина теплового потока, отводимого от слитка уменьшается на 15%, а температура меди на уровне мениска снижается на 42°C.

3. Создан эффективный способ уменьшения осевой химической неоднородности и улучшения структуры непрерывнолитого слитка за счет воздействия на процесс макрохолодильником.

4. Выполнена оптимизация геометрии узких стенок кристаллизатора в виде нелинейной конусности, позволившая увеличить их стойкость и улучшить качество поверхности заготовки.

5. Показаны возможности разливки стали в сортовую заготовку без возвратно-поступательного движения кристаллизатора и увеличения скорости вытягивания слитка без ухудшения качества осевой зоны с помощью использования ультразвука. Ультразвуковая вибрация рабочих стенок кристаллизатора расширяет приповерхностную зону мелких кристаллов, изменяет глубину следов вплоть до ликвидации заворотов, позволяет уменьшить содержание кислорода и азота при одновременном измельчении дендритной структуры поверхностного слоя слитка и увеличить модуль упругости металла в этом слое в диапазоне температур обработки давлением на 10—12%

Литература

1. *Исаев О.Б.* Применение внутренних водоохлаждаемых и расходуемых холодильников при непрерывной разливке слябов при изготовлении сортового и профильного проката // *Сталь*. – 2010. – № 2. С. 14-16.
2. *Исаев О.Б., Носоченко О.В., Лепихов Л.С. и др.* Непрерывная разливка стали с вводом макрохолодильников для повышения качества толстолистового проката // *Электрометаллургия*. – 2002. – № 8. – С. 20–24.
3. *Радюк А.Г., Андросов Н.В., Копылев А.Ф.* Восстановление кристаллизаторов путем нанесения газометрических покрытий// *Сталь* №7 – 1998. – с 37-40
4. *Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д.* Машины непрерывного литья слябовыхзаготовкой. – М. *Металлургия* – 1991. – 272с.
5. *Емельянов В.А.*, ред. Учебн. пособие для вузов.- М. *Металлургия* – 1995. – 143с.
6. *Самойлович Ю.А., Крулевецки С.А., Горяшов В.А., Кабаков З.Н.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали / – М. *Металлургия*, 1982 –152с.
7. *Марченко И. К.* Полунепрерывное литье стали.- М. *Металлургия*, 1986. – 226с.