

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ В ЗАКРЫТОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Кушнерова Е.Ю.¹, Кожанов В.А.², Бредихин В.Н.² (1 - ДонНТУ, 2 - ДонНИПИЦМ, Донецк, Украина)

The investigations of the billet forming in horizontal continuous casting unit have been done using experimental and statistical methods. The character and nature of the billet solidification asymmetry is given as well as thermal procedure of the horizontal closed mold in non-ferrous metals casting.

Введение. Анализ особенностей теплосъема, макро-, микроструктуры и механических свойств формирования заготовки на установках горизонтального непрерывного литья (УГНЛ) приводит к следующей физической модели данного процесса. В установившемся режиме вытягивания основное влияние на формирование заготовки оказывают термоконвективные потоки в жидком ядре, жидко-твердой и твердо-жидкой зоне. Наиболее интенсивные термоконвективные потоки существуют в зоне жидкого-твердого ядра. В последующих зонах, согласно работам Ю.А. Нехендзи и А.М. Самарина [1], когда от металла отведена ≈ 20 % теплоты кристаллизации, термоконвективный поток практически исчезает.

Задачей исследования является исследование влияния технологических факторов на тепловые потоки в горизонтальном закрытом кристаллизаторе на УГНЛ, характер формирования структуры и распределение тепловых потоков в зоне кристаллизатора. Экспериментально-статистическими методами исследована природа ассиметрии процесса затвердевания заготовки в горизонтальном закрытом кристаллизаторе.

Основная часть исследований. Термоконвективные потоки в горизонтальном цилиндре рассматриваются в виде суперпозиции базисных движений [2], одним из которых является движение жидкости в вертикальной плоскости, проходящей через ось цилиндра. Эта составляющая и является определяющей в горизонтальном кристаллизаторе.

На рис. 1 представлен характер конвективных потоков при формировании заготовки в горизонтальном кристаллизаторе.

Горячий металл с температурой $\theta^{(1)}_{ж}$ входит в кристаллизатор, омывает лунку по границе жидко-твердой зоны и выходит из кристаллизатора с температурой $\theta^{(2)}_{ж}$. Значение $\theta^{(1)}_{ж}$ больше $\theta^{(2)}_{ж}$ на величину перегрева жидкого металла.

В начале формирования заготовки на стенках водоохлаждаемой графитовой вставки кристаллизатора (формообразователя) формируется корочка с очень малым значением σ_g .

На образовавшуюся корочку в этот период действуют три силы: гравитационная, усадочная и металлостатического давления. Эффективный зазор между корочкой и графитовой вставкой кристаллизатора в этот период минимальный, но в нижней части несколько меньше, чем в верхней (рис. 2).

Под эффективным зазором подразумевается такой воздушный зазор, тепловое сопротивление которого равно тепловому сопротивлению между заготовкой и графитовой вставкой кристаллизатора.

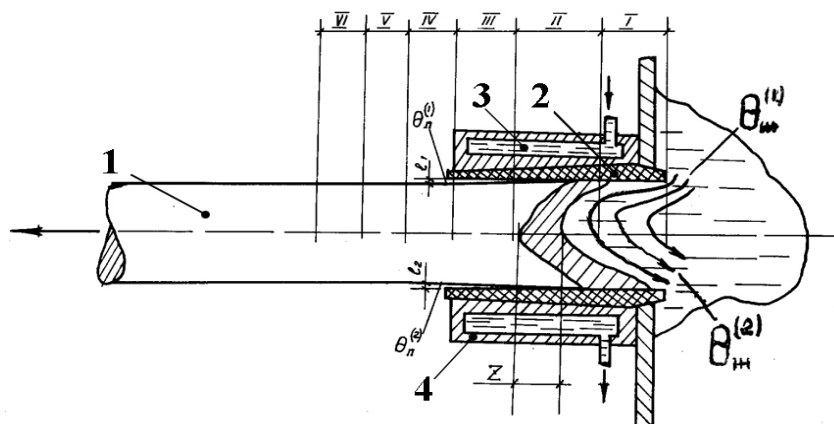


Рис. 1. Процесс затвердевания заготовки на УГНЛ
1-заготовка (слиток), 2-графитовая вставка кристаллизатора, 3 - вода охлаждения кристаллизатора,
4-медная водоохлаждаемая рубашка кристаллизатора.

Действие металлостатического давления и гравитационной силы, при сформировавшейся корочке, на зазор незначимо. В этом случае значение зазора определяется только усадочными процессами затвердевшего металла, значение которых определяется температурным полем заготовки.

Асимметрия аккумулированного тепла, возникающая в следствии термоконвективного расслоения жидкого металла, приводит к большей усадке заготовки снизу, чем сверху.

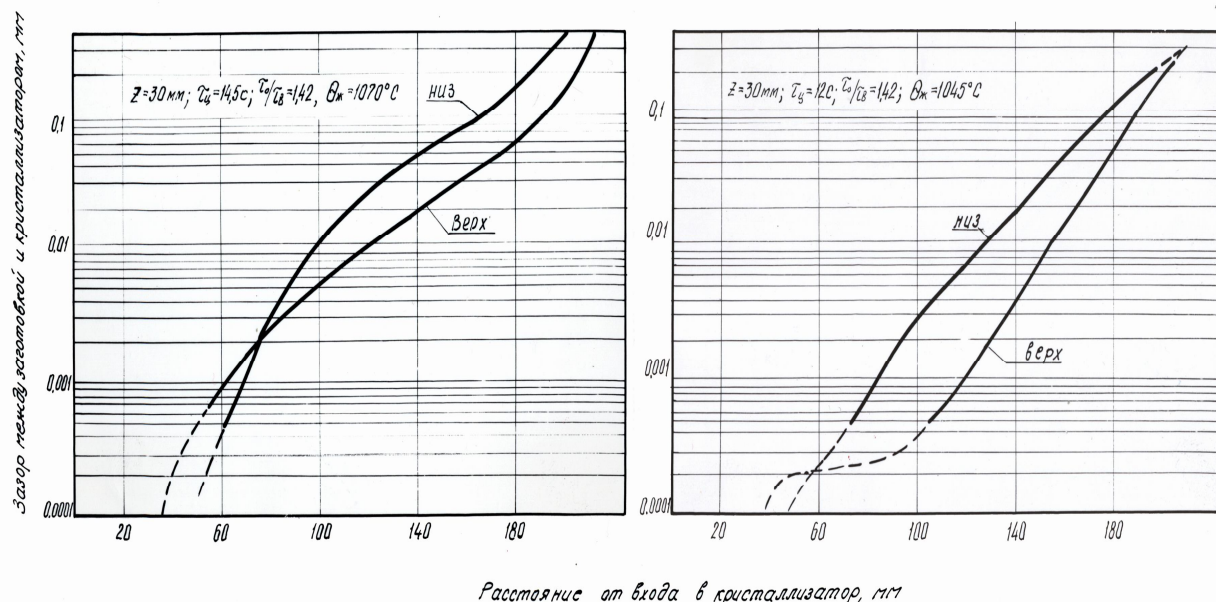


Рис. 2. Формирование воздушного зазора «заготовка – графитовая вставка»

Следовательно, определяющим фактором при формировании зазора является термоконвективное расслоение в жидкой фазе металла, что приводит к асимметрии теплосодержания заготовки.

В верхней части кристаллизатора стационарная корочка отсутствует, т.к. она смывается термоконвективными потоками, имеющими температуру жидкого металла $\theta_{жс}$.

Поступающий металл в нижнюю часть кристаллизатора с $\theta^{(2)}_{жс} \approx \theta_{лик}$ (для Бр.ОЦС 5-5-5, $\theta_{лик} \approx 1015^\circ\text{C}$) способствует росту стационарной корочки.

Вся теплота перегрева, поступающего в кристаллизатор жидкого металла, отбирается в верхней части, поэтому рост $\theta^{(1)}_{жс}$ или производительности установки Π приводит к увеличению теплового потока сверху, который при этом практически не изменяется (рис. 3).

В центральной части заготовки (тепловой центр) термоконвективные потоки изменяют вектор скорости потока на противоположный. Это приводит к ещё большей турбулизации потока жидкого металла, поэтому зона теплового центра на макроструктуре заготовок, отлитых в горизонтальный кристаллизатор, ассиметрична и в верхней части заготовки состоит из мелких разориентированных кристаллитов (рис.4).

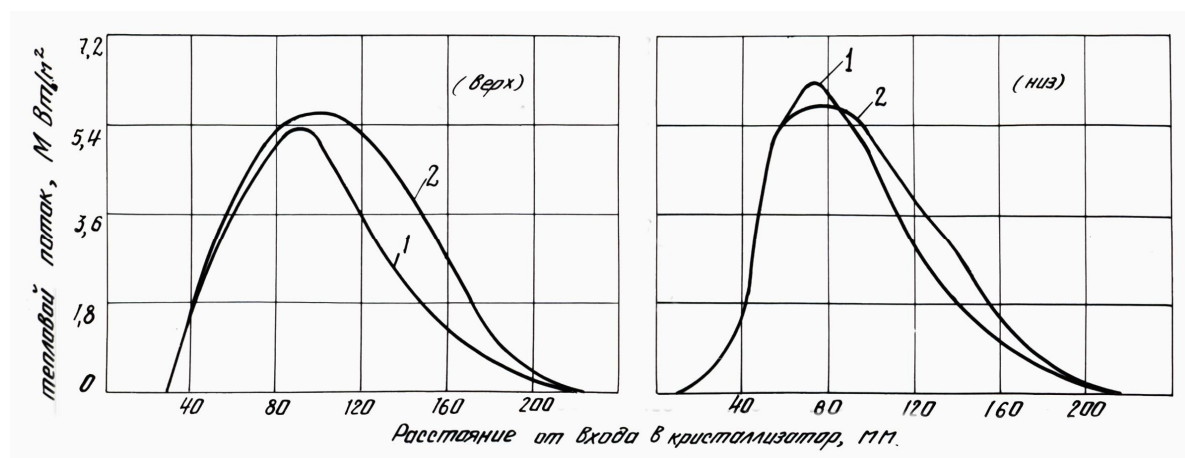


Рис. 3. Распределение теплового потока по длине кристаллизатора
1- $\tau_{ц}=19,5$ сек; 2- $\tau_{ц}=14,0$ сек; при $\theta_{жс}=1070^\circ\text{C}$; $Z=30$ мм; $\tau_0/\tau_{в}=1,4$.

В нижнюю часть заготовки (ниже теплового центра) жидкий металл приходит с температурой, не значительно превышающей $\theta_{лик}$, течение его стабилизируется, что способствует свободному росту кристаллитов.

При увеличении $\theta^{(1)}_{жс}$ термоконвективный поток увеличивается и начинает выносить в потоке легкоплавкие компоненты сплава (олово, свинец) в нижнюю часть заготовки. Этим объясняется понижение температуры ликвидуса снизу заготовки на $5?10^\circ\text{C}$ при увеличении $\theta^{(1)}_{жс}$ на $100?150^\circ\text{C}$.

При снижении температуры жидкого металла $\theta_{жс} \approx$ до 1020°C или производительности Π на $50?60\%$ ниже номинального значения в заготовке наблюдаются надрывы в нижней части заготовки, что свидетельствует об отсутствии стационарной корочки сверху заготовки и наличии таковой снизу. Зарождаясь, верхняя корочка практически вся смывается термоконвективным потоком с температурой $\theta^{(1)}_{жс} > \theta^{(сол)}_{жс}$

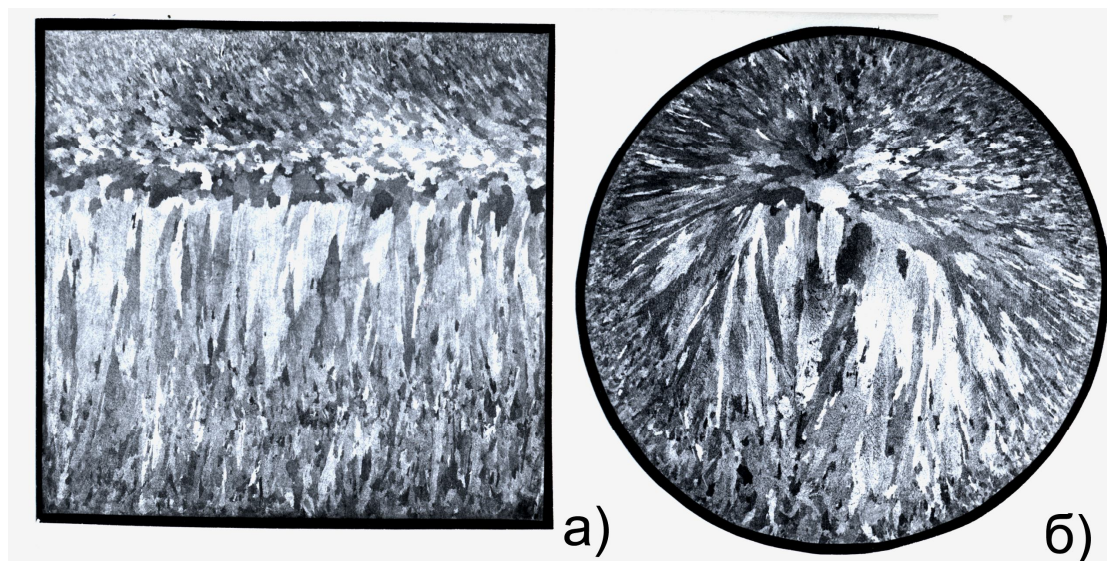


Рис. 4. Макроструктура заготовки при $\theta_{жс} = 1050^{\circ}\text{C}$, $Z=30\text{мм}$, $O = 100\text{мм}$

а) - продольный темплет; б) - поперечный темплет.

Затвердевание заготовки в горизонтальном кристаллизаторе можно представить, разбив процесс затвердевания на шесть зон (рис.1).

В зоне кристаллизатора, в зависимости от интенсивности охлаждения, существует три зоны.

Первая зона $l \approx 0 \div 40$ мм от входа в кристаллизатор характеризуется малым тепловым потоком (рис.3) из-за удаленности канала охладителя. Изотермы в этой зоне располагаются практически перпендикулярно к поверхности кристаллизатора, рис.5.

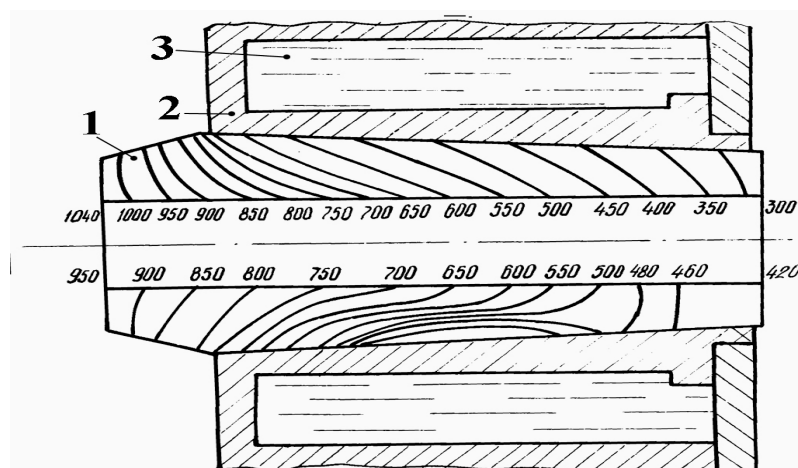


Рис. 5. Температурное поле в графитовой вставке кристаллизатора

1-графитовая вставка (формообразователь), 2-медная водоохлаждаемая рубашка, 3-охлаждающая вода.

На рис.6 приведены графики распределения температуры поверхности по длине кристаллизатора при тех же режимах. При этом видно, что в конце кристаллизатора рост величины зазора снижается (рис.2), тепловой поток падает (рис.3), температура заготовки стабилизируется (рис 6.2), температура графитовой вставки несколько повышается (рис.6.1).

Вторая зона - зона прямого активного охлаждения, где тепловой поток максимален (рис.3). Изотермы имеют максимальное наклонение и градиент их максимально увеличивается, рис.5.

Третья зона - зона прямого охлаждения через воздушный зазор, угол наклона изотерм и градиент в этой зоне, рис.5. постепенно уменьшаются.

Значение и характер тепловых потоков в начале и конце кристаллизатора эквивалентны.

Зона четыре и шесть - естественное воздушное охлаждение и значение теплопередачи зависит от окружающей среды.

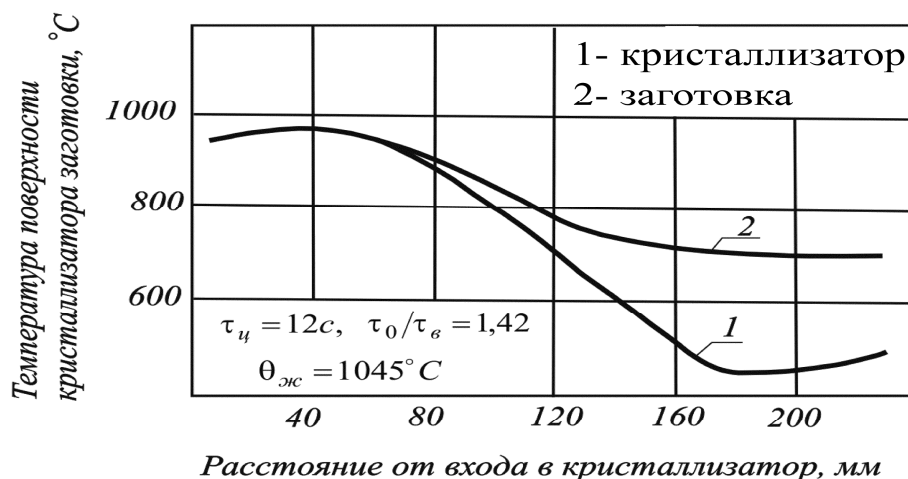


Рис. 6. Распределение температуры по поверхности графитовой вставки и заготовки.

В зоне 5 возможно естественное охлаждение или спрейерное (душирование). Расход воды в зоне при спрейерном охлаждении составляет 0,1?0,2 % от расхода воды в кристаллизаторе. Температура заготовки при оптимальной производительности с применением душирования на 100?200 °C ниже, чем без него и составляет 500?600°C.

Во второй зоне (прямое активное охлаждение) начинает интенсивно формироваться воздушный зазор по длине кристаллизатора, имеющий экспоненциальный характер.

Характерным для горизонтального кристаллизатора является опережающий рост зазора снизу на 15?20% по сравнению с верхом заготовки и эта разность сохраняется постоянной по длине кристаллизатора, рис.2.

При увеличении значений температуры $\theta_{жс}$ или производительности Π выше номинальных значений зазоры в конце кристаллизатора становятся равными, рис.2, (правый).

Построенные расчетные профили лунки для различных режимов, рис.7. с указанием переходной зоны, линии солидус-ликвидус позволяют проследить изменения профиля от технологических режимов.

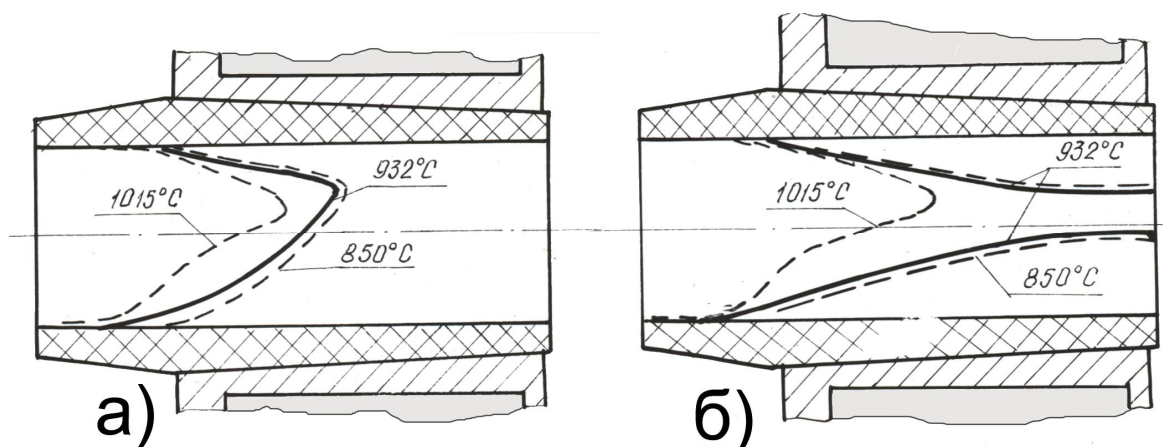


Рис. 7. Форма лунки и переходная зона при формировании заготовки
а) - $\tau_{\text{ц}} = 14$ сек, $\tau_0 / \tau_{\text{в}} = 1,42$; $\theta_{\text{жс}} = 1045^\circ\text{C}$; **б)** - $\tau_{\text{ц}} = 12$ сек, $\tau_0 / \tau_{\text{в}} = 1,42$; $\theta_{\text{жс}} = 1070^\circ\text{C}$

Увеличение температуры жидкого металла $\theta_{\text{жс}}$ и производительности Π приводят к расширению переходной зоны и выходу ее за пределы кристаллизатора, рис.7 (правый). Это приводит к повышению температуры поверхности заготовки на выходе из кристаллизатора и образованию широкой переходящей зоны. Прозвучивание ультразвуком (3) выходящей заготовки из кристаллизатора показало также наличие жидкой фазы в центре заготовки при этих режимах и распространение ее на 100?300 мм за границу кристаллизатора.

На полученных темплетах наблюдается наличие трех зон:

- корковая зона, представленная мелкими равноосными кристаллитами;
- промежуточная зона, состоящая из разориентированных кристаллитов, радиальная ось которых в 2?3 раза превосходит кристаллиты корковой зоны. В этой зоне наблюдается тенденция к некоторой ориентации кристаллитов по тепловому градиенту. Радиальная ось кристаллитов несколько больше тангенциальной;
- зона крупных ориентированных по тепловому потоку кристаллитов, радиальная ось которых в 5?10 раз превосходит тангенциальную (4).

Ширина двухфазной зоны и пропорциональное её значение температуры поверхности в верхней части заготовки на выходе из кристаллизатора являются показателем эффективности тепловой работы кристаллизатора (5).

Оптимальный режим работы УГНЛ, максимальное значение качественных характеристик литой заготовки, характеризуется совпадением теплового центра с геометрическим, мелкими равноосными кристаллитами и практически отсутствием переходных зон (рис.8).

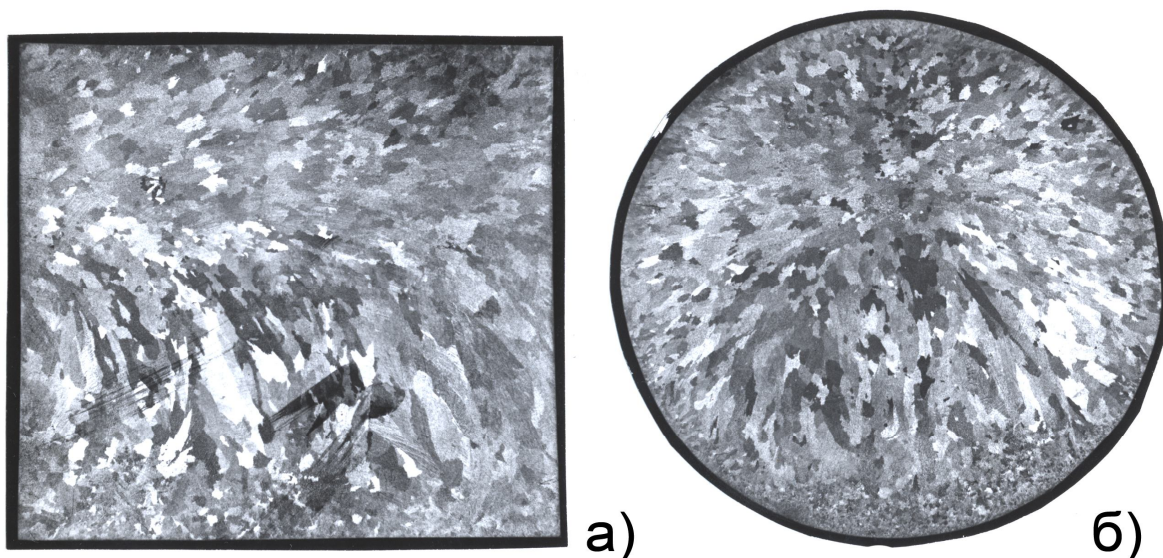


Рис. 8. Макроструктура заготовки при оптимальном режиме литья заготовки
 а) - продольный темплет; б) - поперечный темплет; $\theta_{жс} = 1050^{\circ}\text{C}$, $O = 100\text{мм}$, $\Pi = 6,7$
 м/час

Выводы. Экспериментально - статистическими методами установлены особенности формирования заготовки на установках горизонтального непрерывного литья (УГНЛ).

Характер затвердевания заготовки в горизонтальном закрытом кристаллизаторе определяются в основном термоконвективными потоками, которые являются функцией температуры расплава на входе в кристаллизатор и параметров вытягивания.

В верхней части кристаллизатора температура металла равна температуре заливки, а в нижней независимо от температуры заливки, температура близка к предельной температуре жидкотекучести металла. Теплота перегрева заливаемого металла отводится через верхнюю часть кристаллизатора.

Ассиметрия аккумулированного тепла в заготовке, при повышении температуры заливаемого металла приводит к увеличению усадки в нижней части кристаллизатора. При повышении температуры выше 1100°C увеличивается структурная асимметрия.

Список литературы: 1. Нехензи Ю.А., Самарин А.М. Труды ЦНИИЛТМ, 1976, №5; 2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: «Наука», 1972; 3. Михайлов И.Г., Изюмский Ф.П., Бредихин В.Н. «Цветные металлы», 1976, №5, с. 52-53; 4. Бредихин В.Н., Кушнерова Е.Ю. Исследование тепловых потоков в горизонтальном кристаллизаторе при литье медных сплавов. Збірник наукових праць ЗДІА, «Металургія», - Запоріжжя. Вип.11, 2005р; 5. Бредихин В.Н., Кушнерова Е.Ю. К вопросу теплопередачи в кристаллизаторе при непрерывном литье цветных металлов. // Металл и литье Украины. - 2006, № 1. -с. 90-93

Сдано в редакцию 20.05.08