

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕДНЫХ
И СТАЛЕМЕДНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ**

Титова Е.С., Сокол А.Н., Титова Т.М., Огурцов А.П., Полетаев В.П.

(НМетАУ, г. Днепрпетровск, ДГТУ, г. Днепродзержинск, Украина)

Тел./Факс: +38 (0569 55 13 89); E-mail: etit@land.ru, tmt1@mail.ru

***Аннотация.** Представлена математическая модель теплофизических процессов, осуществляемых при затвердевании медной и сталемедной заготовок в кристаллизаторе при непрерывном литье меди. Создана программа, моделирующая теплофизические процессы в водоохлаждаемом кристаллизаторе во время формирования указанных заготовок, позволяющая осуществлять наблюдение за процессом получения непрерывнолитой заготовки и определять его оптимальные параметры. Разработанная математическая модель имеет широкое применение и может быть использована для изучения процесса затвердевания маломерной непрерывнолитой заготовки любого металла или сплава в кристаллизаторе*

***Ключевые слова:** технология, процесс, математическая модель, программа, параметры, непрерывное литье, затвердевание, заготовка*

1. Введение

Постоянное расширение сети железных дорог и увеличение скорости движения локомотивов обуславливает актуальность разработки технологий производства медных и сталемедных заготовок для производства проводов, предназначенных для электрификации высокоскоростных железнодорожных магистралей. В условиях отсутствия собственных разработок меди на Украине, периодическом дефиците и постоянно растущей цене на нее на мировом рынке особую актуальность приобретает производство медной продукции из вторичных медных отходов. Одним из возможных вариантов решения проблемы увеличения объема производства высокопрочных медных заготовок, по размерам, близким к размерам готовых изделий, является их получение в процессе непрерывной или полунепрерывной разливки меди. При этом с целью повышения ее конструктивной прочности, без потери высокого уровня электропроводности, целесообразно армировать медь стальной проволокой-вставкой. В то же время отработка параметров технологии получения медных и сталемедных непрерывнолитых заготовок в реальных условиях производства связана с большими материальными и финансовыми затратами, поэтому использование математического моделирования для решения такого рода задачи является наиболее эффективным и рациональным приемом.

Анализ современных публикаций по математическому моделированию процесса формирования непрерывнолитой и полунепрерывнолитой медной заготовки свидетельствует об их немногочисленности, а наличия математических моделей описания процесса затвердевания сталемедной заготовки, получаемой в процессе взаимодействия расплава меди со стальной вставкой нами вообще не выявлено. Тем не менее, приведем обнаруженный ряд сведений и созданных математических моделей, заслуживающих определенного внимания.

Так, в работе [1] приведены некоторые полезные соображения относительно получения крупных промышленных слитков меди с учетом гидродинамики движения расплава, однако нами, в условиях формирования маломерных заготовок, они не могут быть использованы. Большое число работ по моделированию процесса формирования стального слитка с армирующей вставкой, выполненных под руководством Ф. В. Недопекина, (в частности, [2]), также относится к крупным промышленным слиткам и

учитывают одновременно гидродинамику, тепломассоперенос, а, иногда, и физико-химические процессы, имеющие место при их формировании. Математическая модель теплофизических процессов, сопровождающих затвердевание сталемедного композита, разработанная авторами работы [3], касается принципиально иного процесса – взаимодействия большого числа стальных гранул с медным расплавом, но может быть полезна для понимания физической сути процесса затвердевания сталемедных заготовок. Особо следует отметить известные исследования и математическое моделирование, касающееся тепловых особенностей процесса формирования проволочных заготовок из драгоценных сплавов при непрерывной литье в графитовый кристаллизатор, выполненные белорусскими учеными [4, 5]. Разработанная ими модель относится к процессу циклического вытягивания заготовки на установке, отличающейся как конструктивно, так и меньшими размерами в сравнении с используемой нами, что обусловило известные особенности математической модели. Отметим также, что сложность описания процесса затвердевания меди в кристаллизаторе с помощью известного закона квадратного корня состоит в неопределенности коэффициента затвердевания в математическом выражении этого закона, а также заметного влияния на него перегрева над температурой ликвидус металла, поступающего в кристаллизатор (о последнем факте имеется сведение и в работе [6]).

Объектом исследования является технологический процесс формирования маломерной непрерывнолитой медной и сталемедной заготовок, принципиальная схема которого представлена на рис. 1а, согласно которой расплавление меди осуществляют в тигле 1, который размещен в индукционной печи 2. Сущность разрабатываемой технологии состоит в равномерной подаче медного расплава 3, в графитовую полость неподвижного кристаллизатора 4, размещенного в водоохлаждаемой емкости 5 с последующим вытягиванием сформировавшейся заготовки 6 с помощью специальных тянущих роликов 7. В случае получения сталемедной заготовки вместе по оси установки, размещенной в вакуумной камере 8, подают стальную проволоку-вставку.

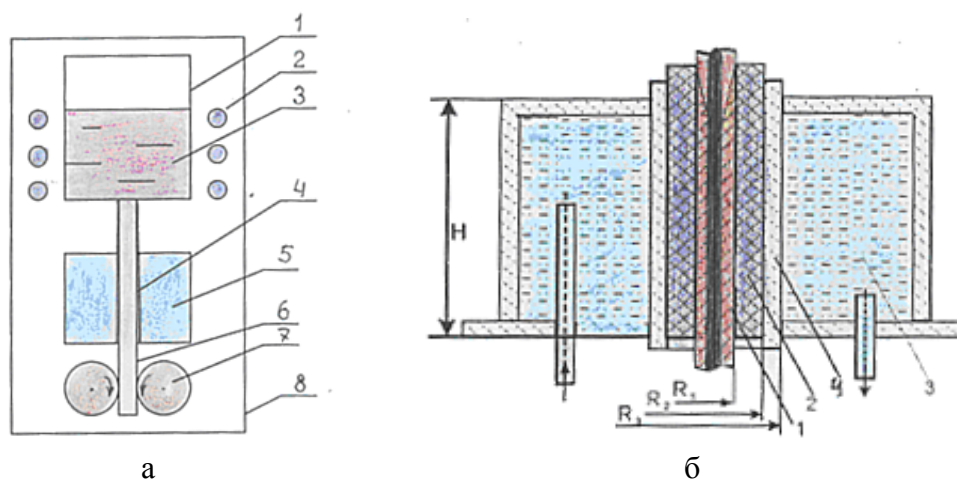


Рис.1. Схематическое изображение (а) установки получения маломерной непрерывнолитой медной заготовки (обозначения – в тексте) и (б) узлов водоохлаждаемого кристаллизатора

Цель работы – определение особенностей влияния теплофизических параметров литья на процесс затвердевания медной и сталемедной заготовки в кристаллизаторе для оптимизации параметров разрабатываемой технологии. Поставленная цель достигается посредством создания соответствующей базовой математической модели, описывающей теплофизические процессы, происходящие в водоохлаждаемом кристаллизаторе с

учетом кристаллизации и плавления заготовки. В случае армирования меди в модель вносят соответствующие изменения.

Безаварийная работа всей установки, размещенной в вакуумной камере, предполагает завершение процесса затвердевания медного расплава, непосредственно, в кристаллизаторе. Определенная специфика разлива меди, ввиду ее высокой теплопроводности, обусловила постановку задачи обеспечения высокой скорости литья при необходимости достижения, одновременно, высокого качества поверхности медных заготовок.

2. Основное содержание и результаты работы

Задачу формирования сталемедной заготовки круглого сечения рассматривали в осесимметричной постановке. Математическая модель включает уравнения передачи теплоты для медного расплава, стальной вставки, внутренней графитовой стенки и внешней медной стенки кристаллизатора с соответствующими краевыми условиями.

При этом учтен также тепловой поток, отведенный от стенки кристаллизатора к воде. Для описания перемещения фронта кристаллизации в формирующейся заготовке введен эффективный коэффициент теплопроводности в двухфазной среде, учитывающий механизм массопереноса тепла по длине заготовки.

В соответствие со схемой, представленной на рис. 1б, расплав меди заданной температуры 1 ($0 < r < R_1$) поступает в кристаллизатор, высота которого H , который состоит из графитовой вставки 2 ($R_1 < r < R_2$) и емкости 3 с водой для охлаждения, внутренняя стенка которой 4 ($R_2 < r < R_3$) выполнена из меди. При этом половину осевого сечения разделили на 3 вертикальные зоны. Теплофизические процессы в каждой из зон описаны соответствующими уравнениями теплопроводности.

Процесс кристаллизации начинается у стенки графитовой, где имеет место интенсивный теплоотвод. При этом важную роль играет продолжительность нахождения меди в жидком состоянии. Поэтому изменение температурных параметров литья, режима охлаждения и скорости вытягивания заготовки позволяет управлять процессом продвижения фронта кристаллизации и температурой заготовки на выходе из кристаллизатора, которые могут оказывать значительное воздействие на качество получаемой заготовки.

Реализацией математической модели является программа, разработанная в среде Borland Delphi 7, позволяющая представлять результаты расчетов в чисельном (таблица) и графическом (изолинии) виде, которые велись до момента стабилизации процесса кристаллизации во времени. При рассматриваемых параметрах затвердевание заготовок завершается уже в нижней трети кристаллизатора. Это свидетельствует об обеспечении необходимого теплоотвода для безаварийного функционирования установки.

Для учета наличия стального сердечника произведено уточнение математической модели посредством ввода еще одной расчетной зоны – зоны армирующей стальной вставки. При этом учтены возможные наплавка слоя меди на стальную вставку и подплавление медной оболочки.

Полученные результаты представлены графически на рис. 2, где по вертикали показана толщина корочки на выходе из кристаллизатора, в % от радиуса заготовки, а по горизонтали – скорость вытягивания заготовки, в м/час.

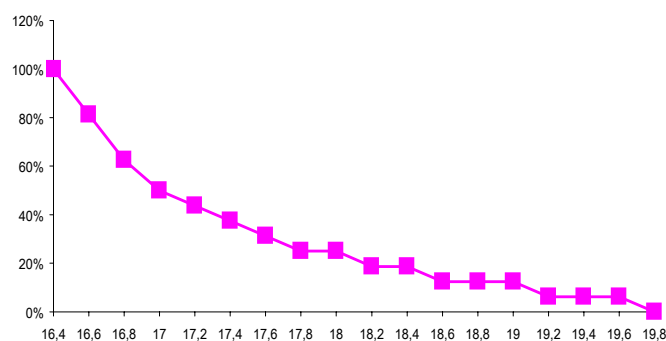


Рис. 2. Зависимость толщины корочки от скорости вытягивания заготовки

Характер зависимости толщины образующейся корочки от скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора для разных режимов охлаждения аналогичен. Отличительной особенностью его является непосредственно диапазон изменения скорости при заданном охлаждении. При расходе воды $45 \text{ м}^3/\text{час}$ этот диапазон составляет $16,4 - 19,8 \text{ м/час}$. С уменьшением расхода воды до $30 \text{ м}^3/\text{час}$ скорость вытягивания заготовки находится в пределах $9,1 - 10,1 \text{ м/час}$.

Таким образом, существенным отличием рассмотренных случаев является то, что в первом из них обеспечивается более широкий рабочий диапазон, в котором можно управлять процессом образования корочки с помощью скоростью вытягивания заготовки. Во втором случае этот диапазон значительно уже. Однако в обоих случаях есть возможность, зная необходимую минимальную толщину корочки, определить максимальную скорость вытягивания, при которой невозможен прорыв оболочки заготовки.

Таким образом, используя программную реализацию созданной математической модели, можно составить таблицы, с помощью которых оператор технологической установки мог бы в любой момент определить оптимальные с какой-то позиции параметры технологического процесса. При этом следует конкретизировать критерий оптимальности, например, использовать предложенный в [6] условный критерий прочности, представляющий собой произведение толщины затвердевшей оболочки на выходе из кристаллизатора на среднее понижение температуры поверхности слитка за время пребывания в кристаллизаторе.

3. Заключение

Впервые разработана математическая модель формирования сталемедной заготовки в кристаллизаторе при непрерывном литье. Определены особенности влияния теплофизических параметров литья на процесс затвердевания биметалла в кристаллизаторе.

Для реализации математической модели создана программа, позволяющая наглядно исследовать процесс затвердевания моно- и биметаллических заготовок в процессе формирования их в кристаллизаторе установок непрерывного литья, а также численно и графически представить результаты расчетов. Определены температурно-скоростной режим технологии отливки в зависимости от скорости вытягивания заготовки, а также оптимальная толщина затвердевающей корочки, исключаящая прорыв расплава.

Настоящая модель может быть использована для математического моделирования аналогичных технологий, предусматривающих формирование в кристаллизаторе непрерывнолитой заготовки из других металлов или их композиций.

Список литературы: 1. Смирнов А. Н. / Особенности полунепрерывной розливки медных заготовок и оптимизация режимов осциляции кристаллизатора / А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз, Ю.Д. Савенков // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. — Випуск 11 (159). — С.145–153. 2. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование

гидродинамики и теплопереноса при формировании композитных слитков / Ф.В. Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов // Технічна фізика та промислова теплоенергетика – 2009. – вип.1. – С.149-158. 3. Затуловский А.С. Теплофизика и кинетика формирования макронеоднородного литого композита системы медный расплав-сталь / А.С. Затуловский, Ю.Н. Пономаренко // Процессы литья. – 2007. – №4. – С. 47–52. 4. Марукович Е.И. Моделирование процесса вертикального непрерывного литья проволочных заготовок / Е.И. Марукович, В.А. Пумпур, В.А. Харьков [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – №1. – С.12 – 15. 5. Марукович Е.И. Анализ тепловых особенностей формирования непрерывнолитых проволочных отливок // Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский [и др.] / Литье и металлургия. – 2008. – №2. – С.5–7. 6. Масальский А.С. Исследование затвердевания стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ с целью совершенствования температурно-скоростного режима разливки / Автореферат диссертации на соиск. степени канд. техн. наук. - Магнитогорск - 2009.

MATHEMATIC MODELING OF PROCESS COPPER AND STEEL-COPPER BILLETS SOLIDIFICATION DURING CONTINUOUS CASTING

Titov E. S, Sokol, AN, Titova TM, Cucumber, AP, VP Poletaev

(NMetAU, Dnepropetrovsk, DGTU, city Dneprodzerzhinsk, Ukraine)

Tel / Fax: +38 (0569 55 13 89); E-mail: etit@land.ru, tmt1@mail.ru

Abstract: A two-measured mathematical model, which describes thermophysical processes, taking place at the use of industrial technology of receipt of continuous-cast copper and steel-copper billets, is presented. Created program which designs thermophysical processes in water-cooled mold during forming of nepreryvnolitoi purveyance, taking into account the processes of crystallization and melting of copper. High-quality adequacy of model is confirmed the got results and enables to look after the process of receipt of nepreryvnolitoi purveyance and find his optimum parameters. The developed mathematical model has wide application and can be used for the study of process of crystallization of of small size continuous-cast billets of any metal or alloy in kristallizator

Key words: technology, process, mathematical model, program, parameters, continuous casting, solidification, billet

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСА ТВЕРДІННЯ МІДНИХ І СТАЛЕВОМІДНИХ ЗАГОТОВОК ПРИ БЕСПЕРЕРВНОМУ ЛИТТІ

Титова Е. С, Сокіл О. М., Титова Т. М., Огурцов А. П., Полетаєв В. П.

(НМетАУ, М. Дніпропетровськ, ДДТУ, м. Днепродзержинск, України)

Тел. / Факс: +38 (0569 55 13 89); E-mail: etit@land.ru, tmt1@mail.ru

Анотація: Представлена математична модель, яка описує теплофізичні процеси, що мають місце при одержання безперервнолитої мідної і сталемідної заготовки. Створена програма, що моделює теплофізичні процеси, які мають місце у водоохолоджуваному кристалізаторі під час формування безперервної заготовки, з урахуванням процесів кристалізації та плавлення міді. Якісна адекватність моделі підтверджується отриманими результатами і дає змогу спостерігати процес отримання безперервнолитої заготовки та знайти його оптимальні параметри. Математична модель, що розроблена, має широке вживання і може бути використана для вивчення процесу кристалізації маломірної безперервнолитої заготовки з будь-якого металу чи сплаву у кристалізаторі

Ключові слова: технологія, процес, математична модель, програма, параметри, безперервне литво, твердіння, заготовка

Надійшла до редколегії 20.06.2011 р.