

УДК 519.87

Математическое моделирование физических параметров металла при электрошлаковом переплаве

В. Н. Павлыш, А. В. Левкина
Донецкий национальный технический университет
a.levkina13@gmail.com

Аннотация

Исследуется задача моделирования физических параметров металла (электропроводность, плотность, теплоемкость, вязкость и поверхностное натяжение шлага) при электрошлаковом переплаве. Рассмотрены математические модели взаимосвязи состава шлага от температуры и других факторов, влияющих на качество производимого изделия. Исследована математическая модель определения вязкости расплавленных флюсов при различных температурах, без экспериментов. Приведены расчеты тепловых потоков при электрошлаковом переплаве. Намечены направления дальнейших исследований.

Введение

Изучению процесса электрошлакового переплава посвящено множество работ. Данный процесс имеет различные методы решения задачи по получению металла с ранее заданными свойствами. Но актуальным остается вопрос получения качественного металла и подборка методов его производства.

В ходе процесса электрошлакового переплава протекает множество практически значимых процессов. Данный процесс, включает в себя переплавку расходного электрода, который плавится из-за тепла выделяемого жидким шлаком при прохождении через него электрического тока. Далее происходит капельный перенос электродного металла через слой шлага. Затем следует рафинирование жидкого металла, с помощью шлага нагретого до высокой температуры и затвердевание металла в кристаллизаторе, охлаждаемом водой [1].

Класс задач по фазовым превращениям с выделением или поглощением тепла называются задачей Стефана. В большинстве случаев встречается при процессах плавления и затвердевания [2].

Целью данной работы является математическое моделирование физических параметров металла при электрошлаковом переплаве (ЭШП) и изучение процесса получения слитка с заданными свойствами металла.

При формировании слитка в кристаллизаторе происходит ряд процессов. Сперва пропускается заряд электрического тока, который проходит через жидкий шлак. Под воздействием тока, металлом вырабатывается электрическое сопротивление и как результат вырабатывается тепло. Затем погружается

металлический электрод, который с нагревом начинает оплавляться. Металл каплями перетекает с оплавленной части электрода через шлак в водоохлаждаемую изложницу, в которой постепенно формируется наплавляемый слиток. В результате переплава металл очищается от серы и неметаллических включений, а направленная кристаллизация слитка обеспечивает получение плотной структуры литого металла.

Способ ЭШП изобретен и разработан в институте электросварки им. Е.О. Патона [3] АН УССР в начале 50-х годов. В 1958 г., благодаря высокой технологической гибкости и получению качественного переплавленного металла, ЭШП быстро внедрили в практику отечественной металлургии и машиностроения.

Технологическую схему получения высококачественных заготовок с использованием метода электрошлакового переплава можно представить следующим образом (рис. 1) [4]:

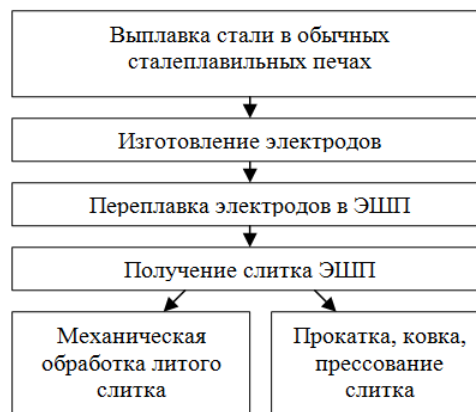


Рисунок 1 - Технологическая схема получения высококачественных заготовок с использованием метода электрошлакового переплава

Постановка задачи

Составим математическую модель расчета параметров шлага для получения заданного качества металла. В названии электрошлакового переплава, можно подчеркнуть, что главным параметром является шлаг. Шлак характеризуется следующими функциями:

- превращения энергии (из электрической в тепловую);
- передачи тепла металлической ванне; рафинирования (удаление вредных примесей и неметаллических включений);
- сохранности металла при вступлении в контакт с окружающей атмосферой;
- затвердевания поверхности слитка.

Чтобы реализовать указанные выше функции, шлаг должен соблюдать ряд условий:

- при плавлении температура металла должна быть выше, чем во время плавления шлага;
- уменьшать затраты электроэнергии;
- обеспечивать высокую стабильность процесса ЭШП;
- поддерживать темп наплавления слитка;
- сохранять устойчивость состава шлага в процессе ЭШП.

Влияние компонентов шлаков на ЭШП

Литературные источники по электрошлаковому переплаву содержат разрозненные данные о влиянии компонентов шлаков электрошлакового переплава на его плотность, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность, поверхностное натяжение, вязкость и другие параметры в зависимости от состава шлага и его температуры. А это, как отмечалось выше, является очень важным аспектом правильного подбора состава шлага и параметров процесса электрошлакового переплава. Кроме этого, важна также и обратная зависимость – возможность путем выбора необходимых параметров шлага рассчитывать необходимое содержание компонентов.

Для любого производственного процесса необходимо проводить моделирование, чтобы учитывать любые критические изменения. В процессе электрошлакового переплава является важным расчет параметров шлаковой ванны. Эти данные влияют на все последующие параметры процесса ЭШП.

Для математической модели расчета состава шлага необходимо рассчитать следующие параметры: плотность шлага, теплоемкость, электропроводность, вязкость и поверхностное натяжение шлага.

Нахождение перечисленных параметров является минимальным условием для эффективного управления процессом ЭШП с

целью получения качественной продукции при минимальных затратах сырья и электроэнергии.

Химические составы флюсов, как и температура их плавления, известны и описаны в источнике [1]. Плотность некоторых промышленных шлаков представлена в табл. 1, где $\gamma_{ш}$ – плотность шлага; $t_{п}$ – температура плавления шлага.

Таблица 1 – Значения плотности промышленных шлаков

Шлак	$\gamma_{ш}$, г/см ³	$t_{п}$, °C
АНФ-ТП	2,53	1340
АНФ-6	2,68	1350
АНФ-291	2,71	1395
АНФ-292	2,78	1415
АНФ-28	2,78	1500
АНФ-32	3,34	1600
АН-75	2,78	1500
АНФ-94	3,27	1450

Электрическое сопротивление шлаковой ванны можно определить по формуле:

$$R = \rho \frac{4h}{\pi 0l^2} = \frac{4h}{\chi \pi 0l^2}, \quad (1)$$

где R – сопротивление шлаковой ванны, Ом;
 χ – электропроводность шлага, Ом⁻¹·см⁻¹;
 ρ – удельное сопротивление шлага.

Источником тепла в процессе ЭШП выступает шлаковая ванна. Когда электрического ток проходит через шлаковую ванну в ней вырабатывается тепло, достаточное для осуществления процесса ЭШП. Количество электрического тока определяется по формуле (2):

$$Q = 0,24I * 2R_t * t, \text{ кал / с}, \quad (2)$$

где I – сила тока;
 R_t – сопротивление шлаковой ванны;
 t – время процесса.

В общем виде тепловой баланс шлаковой ванны может быть представлен следующим уравнением:

$$P = P_{\Sigma} + P_{из} + P_{см} + P_{сл} + P_{ис} + P_{нэ}, \quad (3)$$

где P_{Σ} – мощность, передаваемая от шлага, расходуемая на появление электрода;

$P_{из}$ – мощность потери излучением с неэкранированной электродом поверхности шлаковой ванны;

$P_{ст}$ – мощность, отводимая от тепловой поверхности шлаковой ванны на стенку кристаллизатора;

$P_{сл}$ – мощность, передаваемая на ванну жидкого металла;

$P_{ис}$ – мощность, теряемая при испарении шлака;

$P_{нэ}$ – мощность, теряемая излучением с поверхности электрода.

Значения коэффициента удельного снижения температуры плавления для различных элементов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента удельного снижения температуры плавления.

Элемент, i	K, град/%
C	71
Si	19,7
Mn	4,9
Cr	1,6
Ni	3,9
W	0,9
V	2,0
Mo	1,8
Al	2,7

Удельный расход электроэнергии обуславливается самим шлаком, а именно электрическому сопротивлению, которое он вырабатывает. Чем выше сопротивление шлаковой ванны, тем выше темп переплава электродов. Вырабатываемое тепло тратится на электрод и жидкое состояние массы металла и шлака в ванной. Примерно 30-40 % тепла охлаждаются водой, которая необходима для уменьшения температуры кристаллизатора. Около 10-20 % изливается зеркалом шлаковой ванны, и оставшиеся 30-50 % употребляется на расплавление расходоуемого электрода.

Теплоту, необходимую для осуществления ЭШП, получают, пропуская электрический ток через расплавленный шлак. Полагают, что шлаковая ванна представляет собой чисто активное сопротивление в цепи источника питания и теплота выделяется в ней в соответствии с законом Джоуля — Ленца (3):

$$\bar{Q} = I^2 R_t \tau = IU \tau = U^2 \tau / R_t \quad (3)$$

где I – сила тока, А; R – сопротивление шлака, Ом; U – напряжение; t – время.

При электрошлаковом переплаве резко возрастает длительность процесса, а следовательно, к флюсам предъявляются более жесткие требования по стабильности химического состава, достаточной рафинировочной емкости, физическим свойствам.

В работе [5] представлено уравнение зависимости вязкости флюсов от температуры и выражается в виде экспоненциального закона [6] по формуле (4);

$$\eta = A * e^{-\frac{E\eta}{RT}}, \quad (4)$$

где η – вязкость расплавленного флюса;

A – константа, зависящая от природы расплавленного флюса;

$E\eta$ – энергия активации вязкого течения, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(мольК);

T – температура, К.

Предложенная математическая модель на основе уравнения (4) в работе [5, 6] позволяет определить вязкость расплавленных флюсов для электрошлакового переплава при различных температурах без проведения экспериментов.

В виду множества экспериментов процесса ЭШП, выявлены химические составы сталей и сплавов. Поэтому при составлении математических моделей можно использовать данные переплава металлов. А именно температура плавления металлов отражена в работе [7], в которой подчеркнуты механические возможности флюсов. Среди которых подтверждено исключение одновременного применения флюсов в стационарном и подвижном кристаллизаторах.

Математическое моделирование поверхностного натяжения шлаков ЭШП детально рассмотрено в работе [8] и выглядит следующим образом (5):

$$\sigma = 0,485 + 2,33 \cdot 10^{-3} \cdot \%CaO - 1,29 \cdot 10^{-4} \cdot t \quad (5)$$

где σ – поверхностное натяжение шлака, Н/м;

$\%CaO$ – содержание в шлаке CaO, %;

t – температура шлака, °C.

Представленная математическая модель рассмотрена на примере систем $CaF_2 - CaO$, $CaF_2 - MgO$, $CaF_2 - CaO - Al_2 O_3$, $CaF_2 - CaO - SiO_2 - Al_2 O_3 - MgO$ и системы $CaO - SiO_2 - Al_2 O_3$.

Рассчитанные математические модели зависимости поверхностного натяжения шлаков ЭШП от их состава и температуры показали высокую эффективность (степени достоверности аппроксимации для различных математических

моделей лежат в пределах от 0,81 до 0,96), что позволяет применять их в инженерных расчётах, а также в компьютерных программах, способных максимально точно и быстро определять параметры шлаков по их составу и температуре или подбирать состав по заданным параметрам.

Таким образом, для электрошлакового переплава сталей наиболее приемлемыми являются флюсы на основе фторсодержащих соединений CaF_2 с введением в них Al_2O_3 , CaO , MgO и т.д., что обеспечивает при ЭСП необходимую производительность и получение высококачественного литого электрошлакового металла.

Тепловые потоки в ЭСП

По окончании процесса электрошлакового переплава, получаем готовый слиток, который вытягиваем из кристаллизатора. Чтобы не повредить слиток при вытягивании, по завершению процесса важно обработать металл тепловыми потоками. В данной задаче за основу возьмем пространственную задачу Стефана.

В работе [3] приведена формула температуры металла в виде функции $u(x, y)$. Твердый слиток, находящийся в кристаллизаторе предварительно обогривают с помощью трех электронных лучей W_1, W_2, W_3 . Мощность этих лучей равномерно распределена, один по центру $\{-1 \leq x \leq 1, y = 0\}$, и два других луча по краям $x = \pm 1$. Обозначим критическую температуру T , при которой слиток отделяется от стенок кристаллизатора. Температуру слитка определяем с помощью функционала по формуле:

$$I(v) = \int_H^0 (u(1, y) - T)^2 dy. \quad (6)$$

При расчетах введем ограничение на мощность потока в пределах от 2500 до 5000 МВт/м². Также используем число Пекле $\omega = 2,66$, и число Нуссельта $\omega = 3,05$. Находим минимум функционала I по формуле:

$$I(v_0) = v_0^2 \frac{\sin 2\lambda_0(1 - e^{2\mu_0 H})}{2\lambda_0^2 \mu_0^3 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})^2} - (T)^2 H - 2Tv_0 \frac{\sin 2\lambda_0(1 - e^{\mu_0 H})}{\lambda_0 \mu_0^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})} \cdot \frac{\mu_0 \lambda_0 (1 + \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})}{\sin 2\lambda_0}.$$

где $v_0 = 4T \frac{\mu_0 \lambda_0 (1 + \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})}{\sin 2\lambda_0}.$

Находим второе приближение для минимума функционала I по формуле:

$$I(v_1) = v_1^2 \frac{\sin 2\lambda_0(1 - e^{2\mu_0 H})}{2\mu_0^3 \lambda_0^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})^2} + v_0^2 \frac{\sin 2\lambda_1(1 - e^{2\mu_1 H})}{2\mu_1^3 \lambda_1^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_1}{\lambda_1^2})^2} + 2v_1^2 \frac{\sin 2\lambda_0 \sin 2\lambda_1(1 - e^{\mu_0 H})(1 - e^{\mu_1 H})}{\mu_1 \lambda_1 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_1}{\lambda_1^2}) \mu_0 \lambda_0 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})} - 2Tv_1 \left[\frac{\sin 2\lambda_0(1 - e^{\mu_0 H})}{\lambda_0 \mu_0^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})} + \frac{\sin 2\lambda_1(1 - e^{\mu_1 H})}{\lambda_1 \mu_1^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_1}{\lambda_1^2})} \right] - H(T)^2,$$

где

$$v_1 = 2T^* \left[\frac{\sin 2\lambda_0(1 - e^{\mu_0 H})}{\lambda_0 \mu_0^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})} + \frac{\sin 2\lambda_2(1 - e^{\mu_2 H})}{\lambda_2 \mu_2^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_2}{\lambda_2^2})} \right] A,$$

$$A = \frac{\sin^2 \lambda_0(1 - e^{\mu_0 H})}{\lambda_0 \mu_0^2 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2})^2} + \frac{\sin^2 2\lambda_1(1 - e^{2\mu_1 H})}{2\mu_1^2 (1 + \omega_1 \frac{\cos^2 \lambda_1}{\lambda_1^2})^2} + 2 \frac{\sin 2\lambda_0 \sin 2\lambda_1}{\mu_0 \lambda_0 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_0}{\lambda_0^2}) \mu_1 \lambda_1 (1 + \omega_0 \frac{\cos^2 \lambda_1}{\lambda_1^2})} \cdot \frac{(1 - e^{\mu_0 H})(1 - e^{\mu_1 H})}{\lambda_0^2 \lambda_1^2}.$$

Результаты расчетов тепловых потоков при значения параметров $\omega_0 = 0,3$; $\lambda_0 = 1,1925$; $\lambda_0 = 3,8083$ приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Значения тепловых потоков

T	H	v_0	v_1	$I(v_0)$	$I(v_1)$
0,9	-3,0	3,352	6,506	7,281	45,840
0,9	-4,0	3,352	8,415	6,014	17,010
0,9	-6,0	3,352	11,75	3,378	157,183
0,95	-3,0	3,539	6,878	8,112	51,175
0,95	-4,0	3,539	8,871	6,690	96,936
0,95	-6,0	3,539	11,34	3,764	175,133
0,9	-3,0	4,5	4,5	20,167	18,431
0,9	-4,0	4,5	4,5	19,345	19,255
0,9	-6,0	4,5	4,5	16,548	21,267
0,95	-3,0	4,5	4,5	19,360	17,873
0,95	-4,0	4,5	4,5	17,914	18,668
0,95	-6,0	4,5	4,5	14,927	19,748
0,9	-3,0	11,1	11,1	188,97	154,728
0,9	-4,0	11,1	11,1	194,69	162,962
0,9	-6,0	11,1	11,1	194,77	160,964

Заклучение

В заключении следует отметить, что изучению процесса электрошлакового переплава посвящено множество работ, обзор теоретических основ по данной тематике достаточно подробно приведен в литературных источниках [9-12].

Также необходимо указать, что данный процесс предусматривает различные методы решения задачи по получению металла с заранее заданными свойствами. Однако, проблема получения качественного металла и подборка методов его производства по-прежнему остается актуальной.

В данной статье приведены математические модели по основным параметрам шлака, таким как плотность шлака, теплоемкость, электропроводность, вязкость и поверхностное натяжение шлака, которые оказывают наиболее существенное влияние для получения слитка с заданными свойствами металла.

В качестве направлений дальнейших исследований следует отметить следующие:

1. Используя последние данные с результатами экспериментов можно смоделировать процесс электрошлакового переплава.

2. Зная исходные данные можно спрогнозировать качество изготавливаемого изделия, что в свою очередь может быть использовано в процессе производства.

3. Это позволит в дальнейшем применить уравнение теплопроводности и условие Стефана для получения приближенного анализа процесса кристаллизации подобно исследованиям, описанным в источниках [13-15].

Литература

1. Ключев, М. М. Электрошлаковый переплав / М. М. Ключев, С.Е. Волков.— М. : Металлургия, 1984.— 208 с.
2. Миненко, А.С. Исследование конвективной задачи Стефана на плоскости / А.С. Миненко, А.В. Левкина // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк, 2018. – № 3. – С. 74-83.
3. Патон, Б.Е. Избранные труды / Б.Е. Патон. – Киев : Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2008. – 893 с.
4. Павлов, В. А. Спецэлектрометал-лургия сталей и сплавов : учебное пособие / В. А. Павлов, Е. Ю. Лозовая, А. А. Бабенко.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 168 с.
5. Лопав, Б.Е. Расчёт вязкости флюсов для электрошлакового переплава на основе способа равных сумм / Б. Е. Лопав, И. И. Кагарманов // Машиностроение и машиноведение, 2016. – № 1. – С. 18–21.
6. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч 2. / О. А. Есин, П. В. Гельд – 2-е изд. – М: Металлургия, 1996. – 703 с.
7. Жеребцов, С. Н. Особенности физико-химических и технологических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава / С. Н. Жеребцов, М. В. Романовский // Литье и металлургия. – 2007. – № 1 (41). – С. 118 – 122.
8. Шевченко, А.И. Моделирование одного класса сложных систем с нечетким управлением / А. И. Шевченко, А. С. Миненко, И. А. Сыпко // Доп. НАН України. – 2013. – № 8. – С. 52-54.
9. Меджибожский, М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / Меджибожский М. Я. – Киев-Донецк : Вища школа, 1986. – 280 с.
10. Миненко, А. С. Вариационные задачи со свободной границей / А. С. Миненко. – Киев : Наукова думка, 2005. – 354 с.
11. Миненко, А. С. Исследование осесимметричного течения со свободной границей / А. С. Миненко // Нелинейные граничные задачи. – 1993. – 65–71 с.
12. Миненко, А. С. Исследование одной конвективной задачи Стефана методом Ритца / А. С. Миненко // Укр. мат. Журнал, 2007. – №11. – С. 1546-1556.
13. Миненко, А.С. Математическое моделирование процесса кристаллизации металла при электрошлаковом переплаве / А. С. Миненко, А. В. Левкина // Информатика и кибернетика. – Донецк, 2018. – № 13. – С. 33-36.
14. Миненко, А.С. Исследование конвективной задачи Стефана на плоскости / А.С. Миненко, А. В. Левкина // Проблемы искусственного интеллекта. – Донецк, 2018. – № 3. – С. 74-83.
15. Миненко, А. С. Математическое моделирование и экономическое обоснование процесса кристаллизации металла при электрошлаковом переплаве / А. С. Миненко, А. В. Левкина, Е. В. Радевич // Сборник материалов IV международной научно-практической конференции «Бизнес-инжиниринг сложных систем: модели, технологии, инновации» (ВЕCS-2019) (г. Донецк - Екатеринбург, 14-16 ноября 2019 г.). – С. 292-295.

Павлыш В. Н., Левкина А. В. Математическое моделирование физических параметров металла при электрошлаковом переплаве. Исследуется задача моделирования физических параметров металла (электропроводность, плотность, теплоемкость, вязкость и поверхностное натяжение шлака) при электрошлаковом переплаве. Рассмотрены математические модели взаимосвязи состава шлака от температуры и других факторов, влияющих на качество производимого изделия. Исследована математическая модель определения вязкости расплавленных флюсов при различных температурах, без экспериментов. Приведены расчеты тепловых потоков при электрошлаковом переплаве. Намечены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, шлак, теплопроводность, моделирование, флюсы, электропроводность.

Pavlysh V. N., Levkina A. V. Mathematical modeling of physical parameters of metal during electroslag remelting. The problem of modeling the physical parameters of metal (electrical conductivity, density, heat capacity, viscosity and surface tension of slag) during electroslag remelting is investigated. Mathematical models of the relationship of slag composition to temperature and other factors affecting the quality of the manufactured product are considered. A mathematical model for determining the viscosity of molten fluxes at various temperatures, without experiments, is investigated. Calculations of heat fluxes during electroslag remelting are given. The future directions are determined.

Keywords: electroslag remelting, slag, thermal conductivity, modeling, fluxes, electrical conductivity.

Статья поступила в редакцию 09.11.2021
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.