

УДК 628.16.046:669.187.5

А.А. Троянский /д.т.н./, А.Ю. Пасечник, С.Н. Ратиев
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК ЭШП

Проведен анализ математических моделей, описывающих теплораспределение в шлаковой ванне при электрошлаковом переплаве. Предложена модель, основанная на схеме замещения шлаковой ванны эквивалентной электрической схемой для расчета поля потенциалов, позволяющая получить распределение температуры по сечению шлаковой ванны и слитка, описывающая процесс выплавки биметаллического слитка сталь-медь методом электрошлакового переплава.

Ключевые слова: электрошлаковые технологии, теплораспределение, моделирование, многослойные отливки.

Постановка проблемы

Электрошлаковая технология (ЭШТ) как одно из направлений специальной электротехнологии уже более полувека занимает ведущее место в производстве слитков и отливок для изделий ответственного назначения. Связано это, помимо способности глубокого рафинирования, с благоприятными условиями и в определенной мере управляемостью процесса кристаллизации металла при электрошлаковом переплаве в охлаждаемом кристаллизаторе.

Известно, что формирование структуры [1] и качество будущего слитка либо отливки ЭШП (электрошлаковый переплав) зависит от формы и глубины металлической ванны. Кроме того, при использовании ЭШТ для получения слоистых (многослойных) отливок текущие параметры металлической ванны определяют качество сплавленных слоев и протяженность переходных зон [2,3,4].

Управлять параметрами металлической ванны (глубиной и формой) и ее тепловым состоянием в целом можно за счет следующих методов и способов:

- изменение по ходу плавки электрических параметров (величины тока и напряжения), наложение электромагнитных полей;
- изменение коэффициента заполнения кристаллизатора, размеров и расположения расходуемых электродов – источников каплеобразования;
- использование дугошлаковых процессов [5];
- применение токоведущих кристаллизаторов [6];
- введение в ванну твердых или жидких материалов [7,8].

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время для описания теплового состояния шлаковой и металлической ванн, определения управляющих воздействий на их параметры по ходу плавки широко применяют методы моделирования, в частности математического.

Наиболее распространенными из них являются:

1. Построение поля температур на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла с учетом магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне [9,10].

2. Расчет поля потенциалов шлаковой ванны как жидкой токопроводящей среды [11,12] с последующим расчетом теплового поля на основе уравнения Джоуля – Ленца.

3. Расчет поля потенциалов на основе эквивалентной схемы замещения шлаковой ванны [13]. Способ, не отражая физической сущности процессов, происходящих в шлаковой ванне, позволяет относительно просто на основе закона Кирхгофа получить распределение тока и напряжения по сечению шлаковой ванны, то есть начальные энергетические параметры для дальнейшего расчета температурного поля.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является разработка математической модели, позволяющей описать распределение температуры по сечению шлаковой ванны и слитка и на основе полученных закономерностей выбрать оптимальные параметры электрошлакового переплава (ток, напряжение, электропроводность шлака, глубина шлаковой

ванны) для получения минимальной переходной зоны в многослойном слитке.

Основной материал исследования

Указанные выше модели в основном применяются для математического описания классического метода ЭШП (расходуемый электрод – слиток).

Вместе с тем часто возникают задачи по разработке технологии плавки с использованием нерасходуемых электродов, в частности при наплавке меди на стальную подложку [14]. Последняя является частью будущего двухслойного слитка и одновременно затравкой.

Основное требование к такой технологии – получение минимально возможной протяженности переходной зоны. Она может быть получена такой при создании специальных тепловых режимов: температура шлака должна быть выше температуры его плавления на 50...100 °С и находиться в интервале: T плавления меди < T шлака < T плавления стали.

В этом случае, можно обеспечить плавление медной проволоки, подаваемой в шлак, и ее равномерное растекание по поверхности, нагретой до ранее рассчитанной температуры стальной заготовки, обеспечив, таким образом, межатомное взаимодействие металлов и образование твердых растворов в переходной зоне.

Для математического описания тепловых процессов такого варианта электрошлаковой плавки необходима расширенная математическая модель теплового состояния, учитывающая требование получения минимальной переходной зоны.

С этой целью предлагается усовершенствованная модель на основе модели 3, в которой полученные результаты расчета поля температур являются начальным условием для решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности.

Расчет проводили для варианта нагрева стальной пластины диаметром 150 мм и толщиной 20 мм, расположенной на водоохлаждаемом медном поддоне, жидким шлаком (высота ванны 50 мм) в графитовой трубе с толщиной стенки 20 мм, которая теплоизолирована слоем кварцевого песка 50 мм. Шлак состава 20% CaF₂-80% Na₃AlF₆ поддерживали в жидком состоянии за счет выделения в нем джоулева тепла при прохождении электрического тока в цепи «графитированный электрод (диаметр 50 мм) – шлак – затравка – поддон». Использовали жидкий старт.

Значения температур в узлах расчетной сетки шлаковой ванны в начальный период определяли расчетом по методу замещения, согласно модели 3 [13]. Температуру стальной затравки принимали 20 °С.

В последующие периоды плавки темпера-

турное поле в затравке и шлаковой ванне определяли решением дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей по явной схеме:

$$\rho \cdot C \cdot (t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right).$$

Шаг расчетной сетки по вертикальной оси и по радиусу выбрали 5 мм, шаг по времени 1 секунда, что соответствует критерию устойчивости.

Принимали следующие граничные условия:

На поверхности шлаковой ванны – теплообмен с внешней средой происходит конвекцией и излучением.

$$-\lambda_{шл} \frac{\partial t_{шл}}{\partial r} \Big|_{z=0} = \alpha_{шл}^{cp} [t_{шл} - t_{cp}] + c_0 \cdot \varepsilon'_{np} \cdot \left[\left(\frac{t_{шл}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{cp}}{100} \right)^4 \right],$$

где $\lambda_{шл}$ – теплопроводность шлака; $\alpha_{шл}^{cp}$ – коэффициент теплоотдачи между шлаком и внешней средой; $t_{шл}$ – температура шлака; t_{cp} – температура среды; c_0 – коэффициент излучения абсолютно твердого тела; ε'_{np} – приведенная степень черноты.

На поверхности контакта «затравка – медная стенка поддона – охлаждающая вода» теплообмен описывали по упрощенной модели [15]:

$$-\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} \Big|_{z=0} = \alpha_3^n [t_3 - t_n],$$

где α_3^n – коэффициент теплоотдачи затравка – поддон; t_3 – температура затравки; t_n – температура поддона; λ_3 – теплопроводность затравки.

На границе раздела «шлак – стенка тигля, затравка – стенка тигля» теплообмен описывается уравнением:

$$-\lambda_{шл(z)} \frac{\partial t_3}{\partial r} = \alpha_{шл(z)}^{cm} [t_{шл(z)} - t_{cm}],$$

где $t_{шл(z)}$ – температура шлака (затравка); t_{cm} – температура стенки; $\alpha_{шл(z)}^{cm}$ – коэффициент теплоотдачи шлак (затравка) – стенка; $\lambda_{шл(z)}$ – теплопроводность шлака (затравки).

Данное условие применимо при моделировании процессов электрошлакового обогрева слитков, переплава с использованием нерасходуемого электрода и электрошлаковой тигельной плавки [16].

На границе раздела «шлак – стальная затравка» обмен тепла описывается уравнением:

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial z} = \lambda_{шл} \frac{\partial t_{шл}}{\partial z},$$

где $\lambda_{шл}$ – теплопроводность шлака; λ_3 – теплопроводность затравки.

Расчеты осуществляли для половины электрода, шлаковой ванны и затравки с учетом их симметрии относительно вертикальной оси, где

$$\frac{\partial t}{\partial r} = 0.$$

Использовали пакет прикладной программы Microsoft Excel.

В табл. 1 приведены результаты расчета тем-

ператур в различных точках электрода, шлаковой ванны и стальной пластины – затравки через 27 минут от начала плавки ($U=27$ В, $I=600$ А, температура охлаждающей воды до 80 °С).

Адекватность модели проверяли путем сопоставления расчетных показателей с реальными их значениями, измеренными в процессе наплавки меди на сталь на специально разработанной лабораторной установке (рис. 1).

На графике (рис. 2) представлено изменение расчетных и реальных значений температуры шлака во времени.

Табл. 1. Температурное поле шлаковой ванны, затравки

Электрод				1555	1262	1146	1093	1066	1050	1041	1035	1031	1029	1028	Ячейки шлаковой ванны
1353	1479	1521	1542	1555	1346	1228	1160	1120	1095	1079	1068	1061	1057	1055	
1393	1433	1456	1459	1433	1340	1259	1200	1159	1130	1111	1097	1088	1082	1080	
1392	1404	1411	1403	1376	1323	1268	1221	1185	1157	1136	1122	1111	1105	1102	
1379	1381	1379	1368	1344	1309	1270	1233	1202	1176	1157	1142	1131	1124	1121	
1364	1363	1357	1345	1325	1298	1268	1239	1213	1190	1172	1157	1147	1140	1137	
1351	1348	1341	1329	1312	1290	1266	1242	1220	1200	1183	1169	1159	1153	1149	
1340	1337	1330	1319	1304	1285	1265	1244	1224	1206	1191	1178	1168	1162	1159	
1334	1330	1323	1312	1299	1282	1264	1245	1227	1210	1195	1183	1174	1168	1165	
1330	1327	1320	1309	1296	1280	1263	1245	1228	1212	1198	1186	1177	1171	1168	
1077	1075	1069	1061	1051	1040	1027	1014	1001	988	978	969	962	957	955	
827	825	821	816	809	800	791	782	773	764	756	750	745	741	739	
579	578	575	572	567	562	556	550	544	538	533	529	526	524	522	
332	331	330	328	326	324	321	318	315	312	310	308	306	305	304	
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
														Ячейки затравки	
														поддон	

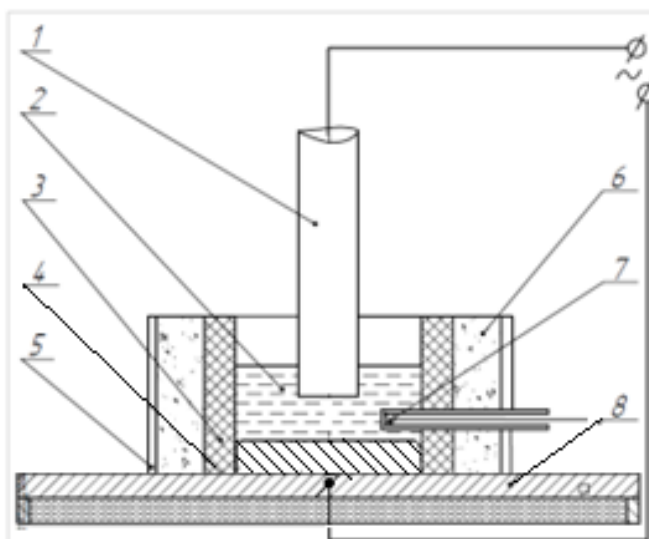


Рис. 1. Схема лабораторной электрошлаковой установки:

- 1 – графитированный электрод; 2 – жидкий шлак; 3 – графитовый тигель;
- 4 – стальная затравка; 5 – кожух; 6 – теплоизоляционный слой, кварцевый песок;
- 7 – хромель-алюмелиевая термопара в графитовой трубке; 8 – водоохлаждаемый поддон

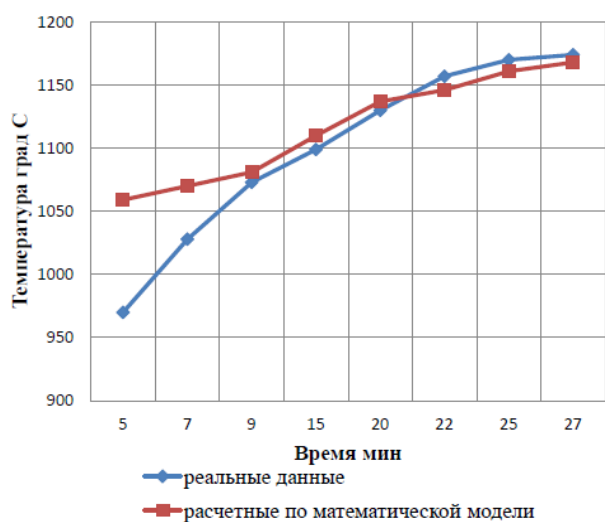


Рис. 2. Изменение температуры шлака во времени по результатам моделирования и опыта

Как видно, за исключением периода времени 0...9 минут, расчетные значения соответствуют фактическим. Различия значений в промежутке времени 0...9 минут объясняются временем, необходимым для прогрева термпары, помещенной в графитовый колпачок, и ее инертностью.

Выводы

Таким образом, представленная в работе математическая модель, учитывающая в дополнение к модели замещения процессы теплопередачи в системе «электрод – шлак – стальная заправка – поддон», с высокой достоверностью описывает распределение температур в реальных условиях и может быть использована для построения реальной технологии получения биметаллических отливок медь – сталь.

Список литературы

1. Латаш, Ю.В. Электрошлаковый переплав / Ю.В. Латаш, Б.И. Медовар; под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Металлургия, 1970. – 239 с.
2. А.с. 548997 СССР, МКИ С 21 С 5/56. Способ выплавки плоских слитков – слябов / Казимиров А.Н. [и др.] (ДПИ). – №2301999/02; заявл. 23.12.75; опубл. 05.11.76 (Не подлежит опубликованию в открытой печати).
3. А.с. 1577171 СССР, МКИ В 22 D 27/04. Способ получения многослойной отливки / Шкляр, В.С., Бершадский А.Г., Троянский А.А. (ДПИ). – №4372833/31-02; заявл. 01.02.88; опубл. 08.03.90 (Не подлежит опубликованию в открытой печати).
4. А.с. 1664456 СССР, МКИ В 22 D 27/04. Устройство для получения горизонтального слитка / Патон Б.Е. [и др.] (ДПИ). –

№4463399/02; заявл. 19.07.88; опубл. 23.07.91.

5. Патон, Б.Е. Дугошлаковый переплав – современное состояние и перспективы развития / Б.Е. Патон, В.Я. Саенко, Ю.М. Помарин // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2002. – №1. – С. 3-10.
6. Медовар, Л.Б. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.П. Стовпченко // Современная электрометаллургия. – 2010. – №3. – С. 5-10.
7. Махненко, В.И. Получение способом ЭШП ЖМ разнородного по длине слитка большого сечения с минимальной переходной зоной / В.И. Махненко [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2012. – №2. – С. 3-7.
8. Еремин, Е.Н. Применение модифицирования для повышения свойств кольцевых заготовок из азотсодержащих нержавеющей сталей, полученных способом центробежного электрошлакового литья // Современ. электрометаллургия. – 2006. – №3. – С. 3-7.
9. Numerical Simulation of the Formation and the Dripping of Droplet / S. Liu [et al.] // Thermal Science. – 2017. – No.3. Vol.21. – P.1241-1250.
10. Droplet Formation and Dripping Behavior during the Electroslag Remelting Process with Two Series-Connected Electrodes / W. Tong [et al.] // Metals. – 2020. – Iss. 3.Vol.10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mdpi.com/journal/metals>
11. Вдовин, К.Н. Оценка производительности установки ЭШП стали 25x1мф с нерасходуемым электродом / К.Н. Вдовин, М.И. Ячиков, А.А. Нефедьев // Сталь. – 2017. – № 3. – С. 26-29.
12. Потапьев, В.И. Генерация тепловой энергии в шлаковой ванне при электрошлаковом переплаве: математическое моделирование / А.Н. Сурков, Н.А. Игизьянова, Т.В. Рябинин // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – №24. – С. 28-31.
13. Использование методов моделирования токораспределения как базы для разработки технологии получения высококачественных слитков методом КЭШП / А.А. Троянский [и др.] // Metallurgical processes and equipment. – 2005. – №2. – С. 25-27.
14. Патент № 104262 Украина, МПК (2013.01) В23К 9/00 В23К 9/23 (2006.01) В23/С 703/22 (2006.01). Способ электрошлаковой наплавки меди и её сплавов на сталь / Корицкий Г.Г., Пасечник С.Ю., Пасечник А.Ю.; ДонНТУ. – № а 201303105; заявл. 14.03.2013; опубл. 10.10.2013.
15. Тепловые процессы при электрошлаковом

переплаве: монография / Б.И. Медовар [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1978. – 303 с.
16. Тепловые процессы при электрошлаковом

обогреве твердой заготовки / В.Ф. Демченко [и др.] // Специальная электрометаллургия. – 1981. – №46. – С. 26-32.

A.A. Troyanskij /Dr.Sci. (Eng.)/, A.Yu. Pasechnik, S.N. Ratiev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL
FOR DESCRIBING THE THERMAL PROCESSES OF OBTAINING BIMETALLIC
CASTINGS BY ELECTRO SLAG REMELTING**

Background. *The advantages of electro slag technology as a method of influencing the properties of the remelted metal are the ability to refine from non-metallic inclusions and create conditions for the directed crystallization of the formed ingot. The redistribution of heat flows from the slag (fuel element) to the forming device (mould) and the ingot by changing the current, voltage, the use of current-carrying crystallizers, the introduction of refrigerators, and the imposition of electromagnetic fields makes it possible to control the depth and shape of the liquid metal bath. This is especially important when smelting bimetallic ingots (steel-copper), which are subject to requirements for the size of the transition zone, determined by the depth of the metal bath.*

Materials and/or methods. *Mathematical modelling methods can determine the control parameters of the electro slag process (current, voltage, flow distribution between the slag, mould, and ingot). Currently, models are used based on solving the equation of non-stationary thermal conductivity with internal heat sources, taking into account magnetohydrodynamic phenomena in a slag bath, calculating the potential field of a slag bath as a liquid conducting medium, and calculating the potential field based on an equivalent replacement scheme for a slag bath. To confirm the adequacy of the model, a laboratory installation for surfacing copper on a steel seed was created. During the experiment the temperature of the slag bath and the steel seed was controlled using chrome-alumini thermocouples.*

Results. *An improved substitution scheme is proposed, supplemented by the equation of non-stationary thermal conductivity. The temperature distribution obtained by the substitution scheme is the initial condition for solving the equation of non-stationary thermal conductivity.*

Conclusion. *The results of the comparison allow concluding that the modelling is highly reliable and that the model can be used to develop a technology for smelting bimetallic ingots with a minimum transition zone.*

Keywords: *electro slag technologies, heat distribution, modelling, multilayer castings.*

Сведения об авторах

А.А. Троянский

Author ID: 846837
ORCID iD: 0000-0001-9567-1162
Телефон: +380 (71) 301-98-60
Эл. почта: taa@donntu.org

А.Ю. Пасечник

SPIN-код: 9153-0054
Author ID: 846745
Телефон: : +380 (71) 334-94-84
Эл. почта: aprel-tlsa@yandex.ru

С.Н. Ратиев

Author ID: 813179
ORCID iD: 0000-0002-5436-7524
Телефон: +380 (71) 387-35-97
Эл. почта: rsn@donntu.org

*Статья поступила 02.03.2021 г.
© А.А. Троянский, А.Ю. Пасечник, С.Н. Ратиев, 2021
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров*