

УДК 621.74:66.021.4:669.162.266.442

Лейман Е.В. – ас., Институт производства чугуна и стали, Технический Университет «Горная академия Фрайберг» (IEST TUBAF)

Лахманн С. – ас., IEST TUBAF

Шеллер П.Р. – д.т.н., проф., IEST TUBAF

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ШЛАКОВ НА ТЕПЛОПЕРЕНОС В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Знание свойств шлака в кристаллизаторе важны для управления процессом непрерывной разливки стали и получения качественной продукции. Особенно перенос тепла от слитка к кристаллизатору зависит от процессов в литейном шлаке. Образование кристаллической структуры в шлаке между слитком и кристаллизатором уменьшает теплоотвод, что необходимо при литье перитектических сталей. Затвердевание шлака стекловидно напротив усиливает теплообмен. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований процесса затвердевания синтетических шлаков CaO-SiO_2 с добавлением Al_2O_3 , Na_2O , CaF_2 , TiO_2 в виде диаграмм температура-время-превращение. Температура кристаллизации шлаков зависит от скорости охлаждения. С повышением скорости охлаждения температура кристаллизации снижается. Температура кристаллизации шлаковых смесей, содержащих оксид алюминия и натрия, снижается с повышением содержания данных оксидов в смеси. ДНТТ (техника двух термоэлементов) была использована для качественного определения теплопереноса через шлаки.

Ключевые слова: затвердевание, шлак, перенос тепла, кристаллизатор, диаграмма температура-время-превращение

Введение

В данной работе представлены результаты лабораторных исследований процесса затвердевания синтетических шлаков, а также влияния их микроструктуры на теплоперенос. Процесс затвердевания синтетических шлаков был исследован с помощью техники одной термопары (SHTT Single Hot Thermocouple Technique) В рамках данной работы была опробована возможность применения ДНТТ (DHTT Double Hot Thermocouple Technique) для качественного определения теплопроводности твердых шлаковых смесей.

Постановка задачи

Синтетические шлаки играют важную роль в процессе разлива стали на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Для обеспечения необходимого качества поверхности стальных слитков важны такие качества твердых шлаковых смесей (ТШС), как теплопроводность, вязкость, температуры плавления и кристаллизации. Требования к качествам ТШС зависят от марки стали, типа МНЛЗ и параметров разлива. При охлаждении в кристаллизаторе МНЛЗ, ТШС могут иметь как аморфную, так и кристаллическую структуру, в зависимости от химического состава шлака и скорости охлаждения. При высоких скоростях охлаждения для шлаков характерна аморфная структура. Основные шлаки (основность шлаков больше единицы) зачастую легко рекристаллизуются из-за низкой вязкости. Кристаллический слой шлака, находящийся в промежутке между охлаждающей медной стеной кристаллизатора и стальным слитком, уменьшает теплоперенос в кристаллизаторе, обеспечивая более равномерный теплоперенос [1 – 7]. Теплоперенос между поверхностями слитка и кристаллизатора представляет собой комплексный процесс и складывается из переноса тепла теплопроводностью в шлаке и излучением через шлак.

Целью данной работы являлось исследование влияния химического состава ТШС и скорости охлаждения на процесс затвердевания шлаков, а также влияние процесса затвердевания шлаков на теплоперенос в кристаллизаторе.

Экспериментальная часть

Исследования проводились с помощью техники одной (SHTT Single Hot Thermocouple Technique) и двух термопар (DHTT Double Hot Thermocouple Technique), рис. 1. Данный метод, впервые описанный и примененный японским профессором Кашивая [5 – 7], позволяет наблюдать в реальном времени за процессами расплавления и кристаллизации шлаков. Пробы располагаются на термоэлементе (тип Б), который также служит нагревательным элементом. Протекающие процессы записываются на видео, с которого впоследствии снимаются данные. Данный метод позволяет проводить опыты с атмосферами из различных газов, с различными скоростями нагрева и охлаждения проб (минимальная скорость 1 К/мин, максимальная 3000 К/мин). Результаты исследований представлены в виде диаграмм превращения. Химический состав исследуемых проб представлен в таблице 1. Пробы нагревались с максимальной скоростью 3000 К/мин до температуры 1650 °С, затем охлаждались с различными скоростями охлаждения (10 К/мин, 20 К/мин, 50 К/мин, 100 К/мин, 200 К/мин, 500 К/мин). Нижний интервал температур выбирался индивидуально для каждой

пробы. После охлаждения до необходимой температуры пробы вновь нагревались и охлаждались еще два раза. При проведении опытов по качественному определению теплопроводности шлаков пробы нагревались до 1600 °С и с максимальной скоростью 3000 К/мин охлаждались до 1100 °С. При этом нагревательный элемент 1 нагревался со скоростями 25 и 50 К/с на 100 °С, а на втором регистрировалось повышение температуры.

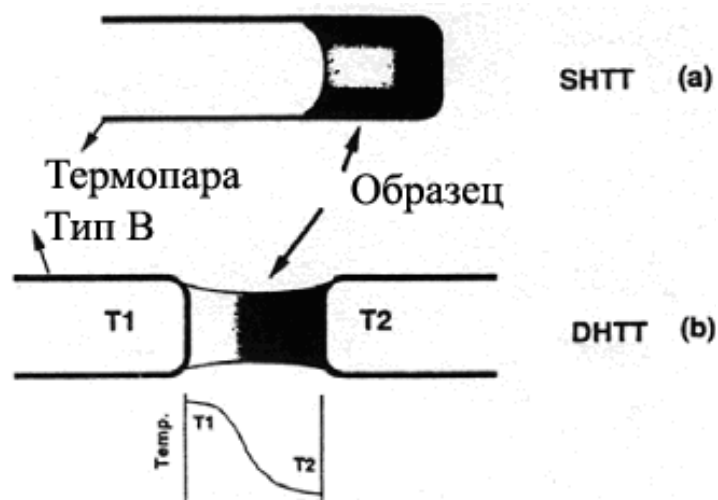


Рис. 1. SHTT/ DHTT – метод

Таблица 1

Химический состав исследуемых шлаковых смесей

Шлак	Химический состав (% масс.)					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	CaF ₂
CS3	54,5	45,5	-	-	-	-
CS3_A4	49,7	44,3	3,3	-	-	-
CS3_A8	49,9	41,7	7,2	-	-	-
CS3_A15	44,8	40,9	14,2	-	-	-
CS3_F4	52,3	43,7	-	-	-	4
CS3_N4	48,7	43,0	-	3,6	-	-
CS3_T2	51,2	45,9	-	-	1,9	-

Результаты

На рис. 2 – 6 представлены диаграммы превращения для исследуемых шлаков. Из-за изменения химического состава жидкой фазы во время процесса затвердевания, шлаки затвердевают в интервале температур. На диаграммах превращения отмечены температуры, при которых начинают выделяться первые кристаллы, происходит затвердевание 50 % пробы и полное затвердевание пробы.

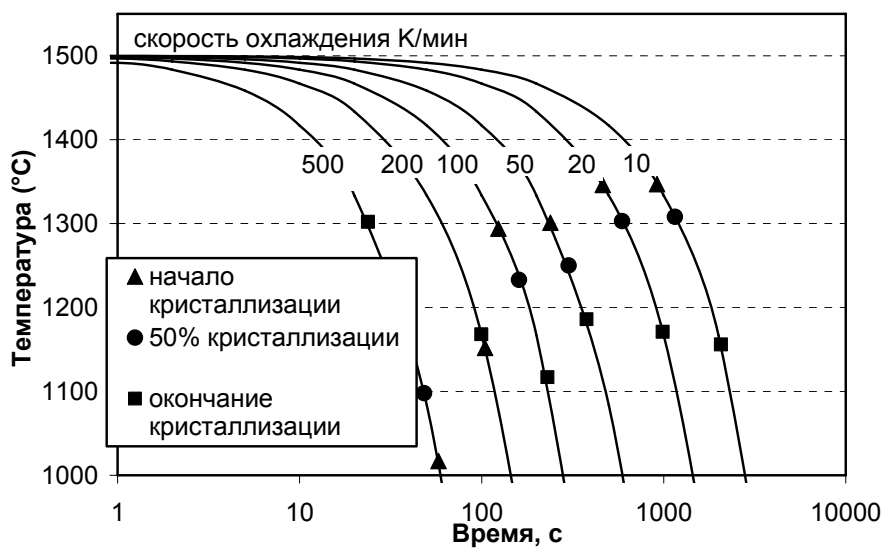


Рис. 2. Шлаковая смесь CS3_A4

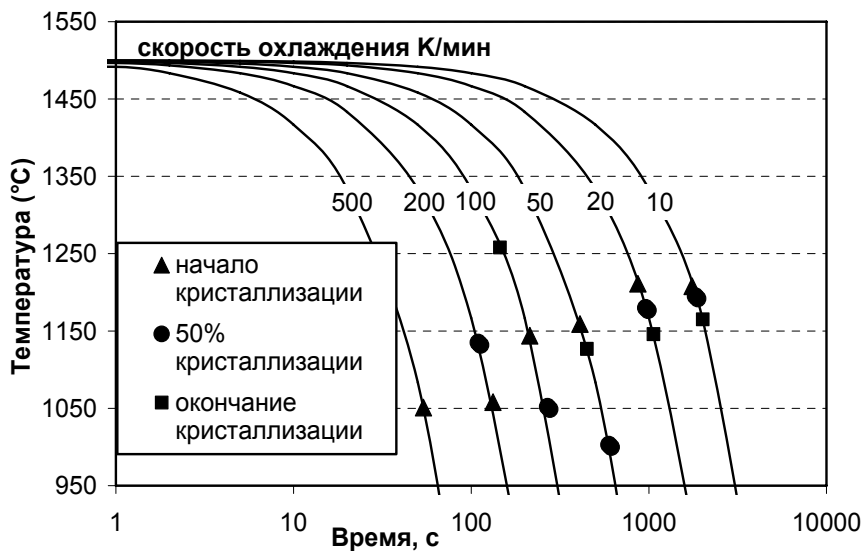


Рис. 3. Шлаковая смесь CS3_A8

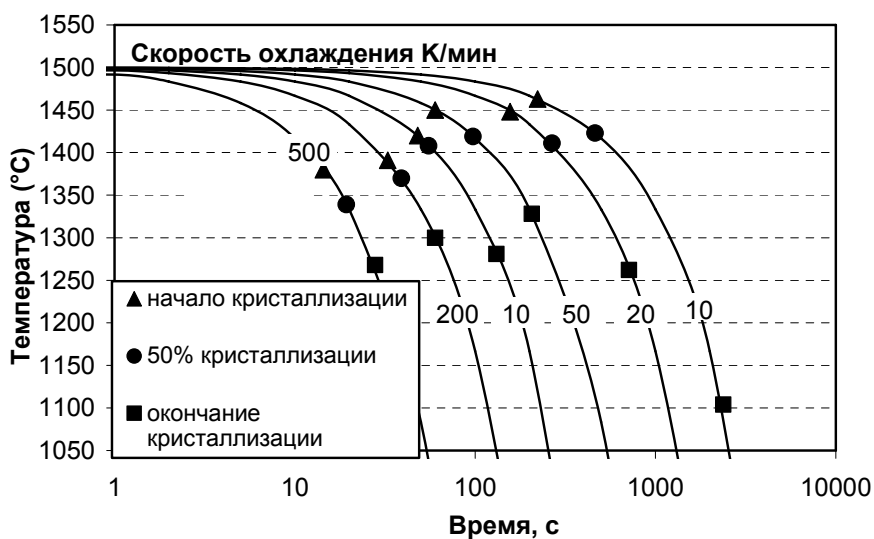


Рис. 4. Шлаковая смесь CS3_F4



Рис. 5. Шлаковая смесь CS3_N4

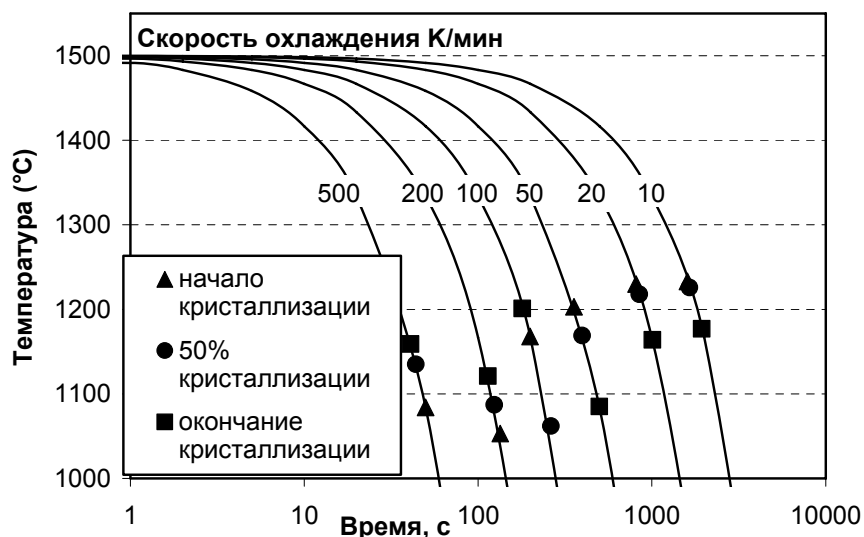


Рис. 6. Шлаковая смесь CS3_T2

На діаграммах превращения можно увидеть, что температура кристаллизации шлаков зависит от скорости охлаждения. Чем выше скорость охлаждения шлаков в кристаллизаторе, тем ниже их температура кристаллизации. Также было замечено, что температура кристаллизации уменьшается при увеличении содержания оксида алюминия. Шлаковая смесь, содержащая 4 % оксида алюминия кристаллизуется быстрее при высоких скоростях охлаждения, чем смесь, содержащая 8 % оксида алюминия. Шлаки, в состав которых входил оксид титана, в процессе изучения показали наименьшую склонность к образованию кристаллов при затвердевании. При средних скоростях охлаждения (50 – 100 К/мин) пробы затвердевали без образования кристаллов. Также у данных шлаков наблюдалось явление «рекристаллизации». Данные пробы кристаллизовались только при очень низких

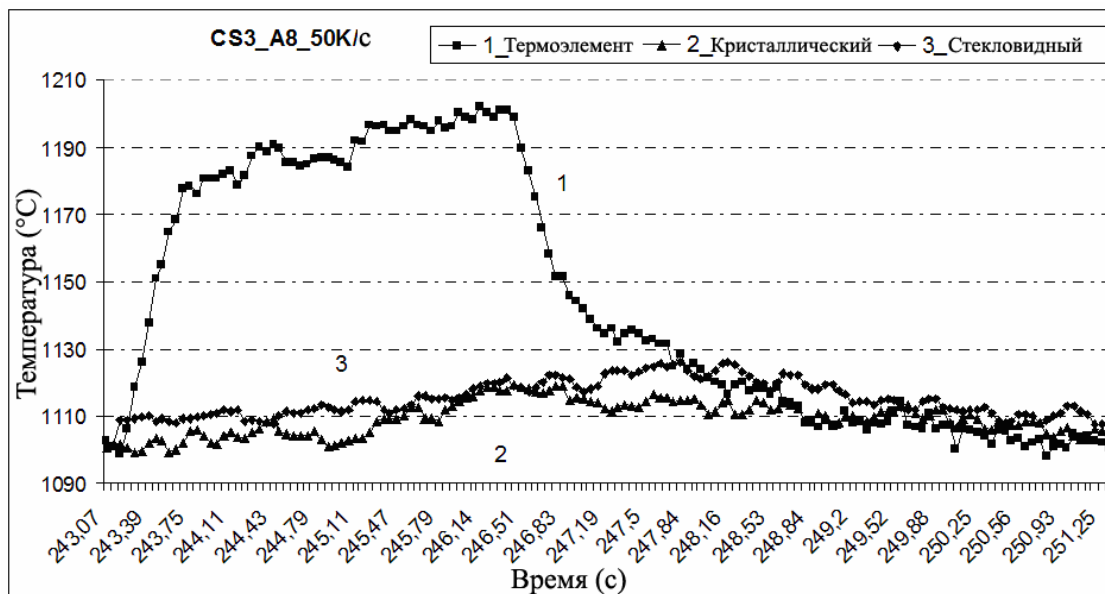
скоростях охлаждения или только при нагреве. Из всех исследованных проб наибольшая склонность к образованию кристаллов наблюдалась у шлаковых смесей, содержащих оксид натрия и фторид кальция. Данные шлаковые смеси кристаллизовались полностью даже при высоких скоростях охлаждения. У шлаковой смеси, содержащей 4% оксида натрия, не наблюдается четкой зависимости температуры кристаллизации от скорости охлаждения. Объяснением данному факту может служить то, что оксид натрия при высоких температурах является очень летучим веществом. Время проведения опыта при низких скоростях охлаждения колеблется от 5 до 7 часов. Поэтому очень высока вероятность улетучивания оксида натрия из пробы и отсутствие наглядной зависимости.

На рис. 7 представлены результаты качественной оценки теплопереноса в шлаковых смесях CS3_A8 и CS3_A15. Микроструктура данных шлаков зависит от скорости охлаждения. Поэтому пробы первоначально охлаждались с максимальной скоростью, чтобы получить аморфную микроструктуру. В процессе эксперимента пробы кристаллизовались и проводились измерения температурного ответа для кристаллической микроструктуры. Температурный ответ, зарегистрированный для аморфной микроструктуры, больше чем для кристаллической микроструктуры. Так можно сделать вывод, что аморфная микроструктура шлаков имеет большую эффективную теплопроводность, чем кристаллическая микроструктура.

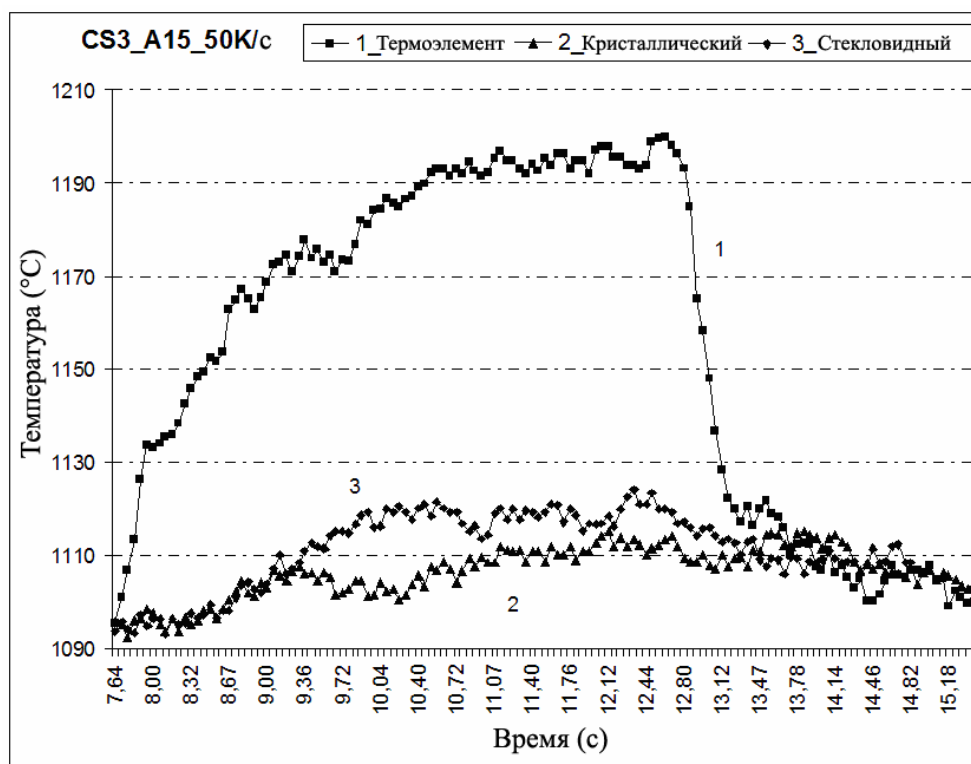
Выводы

Из результатов проведенных экспериментов было заключено, что:

- температура кристаллизации шлаков зависит от скорости охлаждения. С повышением скорости охлаждения температура кристаллизации снижается;
- температура кристаллизации шлаковых смесей, содержащих оксид алюминия и натрия, снижается с повышением содержания данных оксидов в смеси;
- шлаковые смеси CSA, CSF, CSN, CST с основностью 1,2 имеют преимущественно кристаллическую микроструктуру;
- объем аморфной фазы зависит от скорости охлаждения. С повышением скорости охлаждения увеличивается объем аморфной фазы;
- аморфная микроструктура имеет более высокую теплопроводность, чем кристаллическая.



(а)



(б)

Рис. 7. Температурный профиль для шлаковых смесей CS3_A8 (рис. а) и CS3_A15 (рис. б). Температура нагрева и охлаждения 50 К/с.

- 1 – температурный профиль нагревательного элемента 1;
- 2 – зарегистрированное повышение температуры на термоэлементе при нагревании кристаллической микроструктуры;
- 3 – зарегистрированное повышение температуры на термоэлементе при нагревании аморфной микроструктуры

Список литературы

1. Nakada H. Heat transfer trough slag film with crystalline layer / H. Nakada, T. Watanabe, K. Nagata // ICS Proceedings. – 2005. – С. 787–793.
2. Saraswat R. The influence of mould flux on the heat transfer in continuous casting/ R. Saraswat, D. M. Maijer, P. D. Lee // ICS Proceedings. – 2005. – С. 891–902
3. Ozawa S. Simulation of Microstructure and Behavior of Interfacial mold slag layers in continuous casting of steel / S. Ozawa, M. Susa, T. Goto, R. Endo, K. C. Mills // ISIJ International. – 2006. – № 46. – С. 413–419.
4. Kashiwaya Y. Factors on the measurement of the effective thermal diffusivity of molten slag using double hot thermocouple technique / Y. Kashiwaya, K. Ishii // ISIJ International. – 2002. – № 42. – С. 71–79.
5. Kashiwaja Y. Crystallisation behaviors concerned with TTT and CCT Diagrams of Blast Furnace slag using hot thermocouple technique / Y. Kashiwaja, T. Nakauchi, K. S. Pham, S. Akiyama // ISIJ International. – 2007. – № 47. – С. 44-52.
6. Kashiwaja Y. Development of double and single hot thermocouple technique for in situ observation and measurement of mold slag crystallisation / Y. Kashiwaja, C. E. Cicutti, A. W. Cramb, K. Ishii // ISIJ International. – 1998. – № 38. – С. 348–356.
7. Lachmann S. Effect of Al₂O₃ and CaF₂ on the solidification of mould slags and the heat transfer through slag films / S. Lachmann, P. R. Scheller // MOLTEN. – 2009. – С. 118.
8. Lachmann S. Crystallization behaviour of synthetic mould slags / S. Lachmann, P. R. Scheller // ECCS, European Conference on Continuous Casting. – 2008. – С. 1–10.

Рукопись поступила 08.06.2009 г.