

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ ЭШП И МНЛЗ

Л. Б. Медовар¹, Е. А. Педченко¹, А. В. Сибирь², Е. А. Волченков¹, Д. В. Коломиец¹

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальная металлургическая академия Украины.

49600, г. Днепр, пр. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Обсуждено влияние теплопроводности материалов водоохлаждаемых кристаллизаторов ЭШП и МНЛЗ на процесс затвердевания металла. Рассчитаны температурные поля жидкой металлической ванны слитков из высокоуглеродистой стали в кристаллизаторах диаметром 400 мм из меди и жаропрочной бронзы. Показано, что эффект снижения теплопроводности при замене меди на бронзу незначительно влияет на затвердевание слитка ЭШП и непрерывнолитой заготовки. Библиогр. 8, табл. 1, ил. 2.

Ключевые слова: кристаллизатор; электрошлаковый переплав; непрерывная разливка; теплопроводность; износостойкость

Введение. Водоохлаждаемые кристаллизаторы для электрошлакового переплава (ЭШП) практически повсеместно изготавливают из чистой меди, как правило М1. Изредка используют и жаропрочную бронзу БрХ. В то же время водоохлаждаемые кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) изготавливают не только из чистой меди, но и из сплавов меди. Металлурги широко применяют водоохлаждаемые кристаллизаторы уже более 60 лет [1]. Однако и сегодня часто встречаются ситуации, когда на одних и тех же агрегатах используют водоохлаждаемые кристаллизаторы одинаковой конструкции, изготовленные из разных материалов. С учетом того, что толщина рабочей стенки водоохлаждаемых кристаллизаторов обычно достигает 30...35 мм, теплопроводность материала кристаллизатора должна играть существенную роль в теплопередаче от жидкого металла к охлаждающей воде, а значит и скорости затвердевания металла в кристаллизаторе. В совокупности со способностью кристаллизатора отвести от затвердевающего металла теплоту немаловажную роль играет и стойкость кристаллизатора, уровень прочности, твердости, износостойкости и т. д. Процессы, протекающие в кристаллизаторах ЭШП при превращении жидкого металла в твердый, во многом сходны с таковыми в кристаллизаторах МНЛЗ. В статье сделана попытка сравнить материалы, применяемые для кристаллизаторов этих установок, и оценить обоснованность их выбора для рабочих стенок. Влияние теплопроводности материала рабочих стенок кристаллизатора на

процесс затвердевания можно оценить расчетным путем. В то же время, оценить износ кристаллизатора расчетным путем пока не удастся. Поэтому в данной работе сделаны лишь некоторые оценки.

Материалы для кристаллизаторов ЭШП и МНЛЗ. Для рабочих стенок кристаллизаторов традиционно используют сплавы меди. Выбор меди в качестве основы сплава обусловлен ее высокой теплопроводностью. Теплопроводность основных материалов для кристаллизаторов ЭШП составляет порядка 390 для М1 и 315 Вт/(м·К) для жаропрочной бронзы БрХ. При этом жаропрочная бронза обладает большей твердостью (110...115 НВ) по сравнению с медью (90...95 НВ). Для ЭШП промышленная практика применения жаропрочной бронзы БрХ вместо М1 подтверждает уменьшение износа стенок кристаллизаторов. Спектр сплавов меди, применяемых для кристаллизаторов МНЛЗ значительно шире. Сегодня к традиционным сплавам меди с серебром добавились сплавы меди с различными сочетаниями хрома, никеля, циркония и некоторых других элементов [2–4]. Теплопроводность этих сплавов лежит в диапазоне теплопроводности меди и жаропрочной бронзы. В то же время механические свойства этих сплавов дифференцированы для изготовления рабочих стенок кристаллизаторов различных типов. Отметим также, что практически все современные кристаллизаторы МНЛЗ изготавливают с применением многослойных износостойких покрытий на рабочих стенках. Эти покрытия имеют неболь-

шую толщину и поэтому не оказывают существенного влияния на общую теплопроводность стенки кристаллизатора и ее тепловое сопротивление, однако существенно повышают износостойкость кристаллизаторов. Таким образом, при прочих равных условиях существенное значение при выборе материала кристаллизатора должна играть теплопроводность материала.

Анализ тепловых процессов при работе кристаллизаторов. Кристаллизаторы в установках ЭШП и МНЛЗ — это теплонапряженный элемент. Удельный тепловой поток через стенку кристаллизатора составляет порядка 1...3 МВт/м² [5]. Достаточно высокой является температура жидкого металла в кристаллизаторе, особенно в установках ЭШП. Процесс передачи теплоты от жидкого металла к охлаждающей кристаллизатор воде сложен и включает в себя все способы передачи теплоты: теплопроводность, конвекцию и излучение.

Различия в механизме передачи теплоты наблюдаются и по высоте кристаллизатора. Принято выделять две зоны теплообмена. Первая — это зона плотного контакта между стенкой кристаллизатора и затвердевающим металлом слитка ЭШП или непрерывнолитой заготовки, вторая — зона с газовым зазором между стенкой и затвердевшим усаживающимся металлом. Процесс передачи теплоты в первой зоне состоит из нескольких этапов: конвекцией от жидкого металла к затвердевшей корочке; теплопроводностью через корочку металла (и корку шлака при ЭШП) к поверхности кристаллизатора. Через стенку кристаллизатора теплота передается также теплопроводностью, а к охлаждающей воде — конвекцией. Необходимо отметить, что в этой системе существует два контактных сопротивления: твердая корочка металла–шлаковый гарнисаж и шлаковый гарнисаж–поверхность кристаллизатора. Обычно для этой зоны теплообмена условия контакта принимают идеальными.

Во второй зоне теплообмена кристаллизатора физический процесс передачи теплоты такой же, как и в первой, но между стенкой кристаллизатора и шлаковым гарнисажем образуется газовый зазор. Его термическое сопротивление может быть значительным. Теплопередача в этом зазоре осуществляется двумя способами — излучением между поверхностями и теплопроводностью газа. Для кристаллизаторов МНЛЗ дополнительным способом передачи теплоты в этом зазоре является периодический плотный контакт при качании кристаллизатора.

Величина теплового потока от поверхности слитка к охлаждаемой воде определяется следующим уравнением [6]:

$$q = \frac{T_m - T_w}{\sum R_i}, \quad (1)$$

где T_m — температура металла, К; T_w — температура охлаждающей воды, К; $\sum R_i$ — сумма тепловых сопротивлений теплопередачи от металла к воде, (м²·К)/Вт.

В упрощенной схеме можно выделить три основных тепловых сопротивления:

конвективной теплоотдачи от воды к стенке кристаллизатора R_1 . Зависит от скорости движения жидкости и ее свойств. Может быть рассчитана по критериальным уравнениям в зависимости от формы канала, свойств жидкости и скорости движения [6]. На практике величина коэффициента конвективной теплоотдачи α_w имеет значение порядка 35000 Вт/(м²·К) [7]. Тогда значение $R_1 = 1/\alpha_w = 2,86 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт;

теплопроводности стенки кристаллизатора R_2 толщиной ℓ и с коэффициентом теплопроводности λ . Для различных материалов может быть определено по формуле $R_2 = \ell/\lambda$. На практике толщина стенки ℓ составляет 20...30 мм. Тогда для среднего значения толщины стенки из чистой меди при $\lambda_{М1} = 390$ Вт/(м·К) $R_2 = \ell/\lambda = 25 \cdot 10^{-3}/390 = 6,41 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт;

теплоотдачи от кристаллизатора к поверхности слитка. Очень сложный процесс. Если упростить, то максимальное значение α_k редко достигает 3000 Вт/(м·К) для зоны плотного контакта, а для зоны с газовым зазором среднее значение составляет порядка 1000 Вт/(м²·К) [8]. Тогда для первой зоны $R_3 = 1/\alpha_k = 33,33 \cdot 10^{-5}$, а для второй $R_3 = 1/\alpha_k = 100 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

Суммарное тепловое сопротивление (медный кристаллизатор) в первой зоне составляет $\sum R_i = 42,6 \cdot 10^{-5}$, во второй $\sum R_i = 109,3 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

Для случая с материалом кристаллизатора из жаропрочной бронзы изменяется только тепловое сопротивление R_2 и составляет $R_2 = \ell/\lambda = 25 \cdot 10^{-3}/315 = 7,94 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт.

Результаты расчетов приведены в таблице. Очевидно, что изменение теплопроводности материала рабочей стенки кристаллизатора примерно на 19 % изменит ее тепловое сопротивление R_2 всего на 3,5 %. Приблизительно на эту же величину изменится толщина корочки затвердевшей стали для МНЛЗ. Для кристаллизаторов ЭШП доля теплового сопротивления стенки в общем сопротивлении теплопередачи меньше, т. к. толщина слоя шлаковой корочки больше.

Значения тепловых сопротивлений между водой и жидким металлом				
Параметр	Кристаллизатор			
	из меди М1		из жаропрочной бронзы БрХ	
	Значение параметра $R_i \cdot 10^5$, (м ² ·К)/Вт	Доля от общего теплового сопротивления*, %	Значение параметра $R_i \cdot 10^5$, (м ² ·К)/Вт	Доля от общего теплового сопротивления*, %
R_1	2,86	6,7	2,86	6,5
R_2	6,41	15,0	7,94	18,0
R_3	33,33	78,3	33,33	75,5

* Полное тепловое сопротивление равно сумме тепловых сопротивлений $R_1 + R_2 + R_3$.

Для определения влияния материала стенки кристаллизатора с учетом изменения динамики процесса затвердевания и теплового потока проведены сравнительные результаты расчета для кристаллизаторов МНЛЗ и ЭШП. Рассматривали кристаллизаторы для получения круглого слитка диаметром 400 мм.

Для расчета влияния материала на работу кристаллизаторов ЭШП приняты следующие исходные данные: переплаву подвергали высокоуглеродистую сталь с теплопроводностью 45 Вт/(м·К) и теплоемкостью 490 Дж/(кг·К). Производительность ЭШП под шлаком АНФ-28 составила 400 кг/ч. Длина кристаллизатора — 450 мм, а диаметр — 400 мм.

Результаты расчета представлены на рис. 1.

Из рисунка видно, что глубина ванны жидкого металла меньше в случае применения кристаллизатора с рабочей стенкой из меди марки М1. Изменение глубины ванны в целом незначительное (порядка 15 мм). Динамика процесса затвердевания показывает схожий характер и мало отличается друг от друга. Это означает, что для кристаллизаторов ЭШП целесообразно использовать жаропрочную бронзу вместо меди М1, что мало скажется на качестве металла ЭШП, но должно повысить износостойкость кристаллизаторов.

При расчете затвердевания металла в кристаллизаторе МНЛЗ приняты такие исходные данные: высокоуглеродистая сталь (аналогично расчету для ЭШП), кристаллизатор диаметром 400 мм, длина кристаллизатора 1000 мм, скорость вытягивания заготовки 0,5 м/мин. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

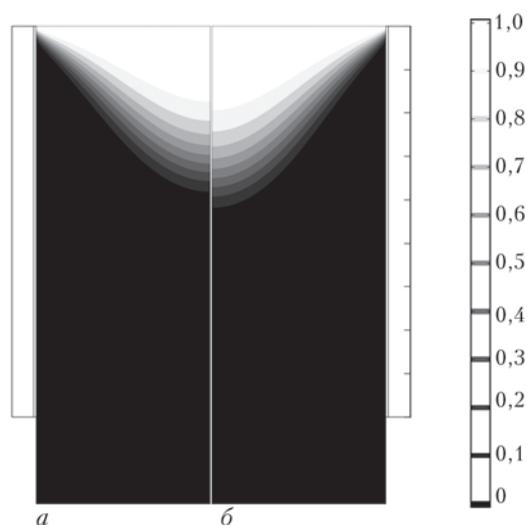


Рис. 1. Форма и глубина жидкой ванны при использовании медного М1 (а) и бронзового БрХ (б) кристаллизаторов ЭШП*

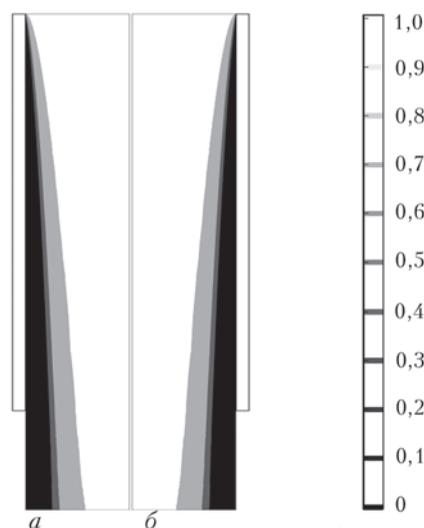


Рис. 2. Форма жидкой металлической ванны и толщина затвердевшей корочки по высоте заготовки в кристаллизаторах МНЛЗ из М1 (а) и БрХ (б)*

Толщина корочки непрерывнолитой заготовки в случае применения кристаллизатора с рабочей стенкой из меди М1 незначительно больше, чем в кристаллизаторе из жаропрочной бронзы (разница порядка 1 мм). С учетом приведенных данных можно также сделать вывод о том, что для кристаллизаторов МНЛЗ применение меди М1 не является обязательным.

Выводы

Анализ работы кристаллизаторов ЭШП и МНЛЗ показал, что теплопроводность не оказывает заметного влияния на затвердевание металла. При выборе материала рабочей стенки кристаллизатора должны учитываться другие технологические

*Изменение цвета на шкале от белого к черному определяет количество жидкой фазы: белый — 100 % жидкости (расплав), черный — 0 % жидкости (полностью твердый металл).

аспекты, такие как износостойкость, ремонтпригодность и др. Поэтому можно рекомендовать замену меди М1 в кристаллизаторах ЭШП на бронзу БрХ.1.

Список литературы

1. Жиганов Н. К., Вольнов И. Н., Фомина Е. Е. Моделирование процессов непрерывного литья цветных металлов и их сплавов: монография, [1-е изд.]. — Тверь: ТГТУ, 2007. — 224 с.
2. Oehler Ch., Korbel H. Design and manufacturing technologies of copper crucible assemblies for remelting, skull melting and cold hearth furnaces // Proceedings of the 2nd Medovar Memorial Symposium (MMS100), 07–10.06.2016, Kyiv (Ukraine). — P. 167–173. [ISBN 978-617-7015-33-7].
3. EM Moulds [электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.coppermoulds.com/ser-down_eng.html.
4. KME: Engineering Copper Solutions [электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.kme.com/en/steel_casting_moulds.
5. Assessment of heat extraction through slab caster mould / A. Paul et al. // Scandinavian Journal of Metallurgy. — 2000. — Vol. 29. — P. 139–145.
6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: [учебник для вузов]. — М.: Энергия, 1975. — 483 с.
7. Analysis of metal mould heat transfer / V. K. de Barcellos et al. // Ironmaking and Steelmaking. — 2010. — Vol. 37, № 1. — P. 47–56.
8. Chen R., Shen H. F., Liu B. C. Numerical simulation of fluid flow and solidification in continuous slab casting mould

based on inverse heat transfer calculation // Ironmaking and Steelmaking. — 2011. — Vol. 38, № 7. — P. 546–552.

References

1. Zhiganov N. K., Volnov I. N., Fomina Ye. Ye. Modelirovaniye protsessov nepreryvnogo litya tsvetnykh metallov i ikh splavov: monografiya, [1-e izd.]. — Tver: TGTU, 2007. — 224 s.
2. Oehler Ch., Korbel H. Design and manufacturing technologies of copper crucible assemblies for remelting, skull melting and cold hearth furnaces // Proceedings of the 2nd Medovar Memorial Symposium (MMS100), 07–10.06.2016, Kyiv (Ukraine). — P. 167–173. [ISBN 978-617-7015-33-7].
3. EM Moulds [elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: http://www.coppermoulds.com/ser-down_eng.html.
4. KME: Engineering Copper Solutions [elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: http://www.kme.com/en/steel_casting_moulds.
5. Assessment of heat extraction through slab caster mould / A. Paul et al. // Scandinavian Journal of Metallurgy. — 2000. — Vol. 29. — P. 139–145.
6. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha: [uchebnik dlya vuzov]. — M.: Energiya, 1975. — 483 s.
7. Analysis of metal mould heat transfer / V. K. de Barcellos et al. // Ironmaking and Steelmaking. — 2010. — Vol. 37, № 1. — P. 47–56.
8. Chen R., Shen H. F., Liu B. C. Numerical simulation of fluid flow and solidification in continuous slab casting mould based on inverse heat transfer calculation // Ironmaking and Steelmaking. — 2011. — Vol. 38, № 7. — P. 546–552.

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВОДООХОЛОДЖУВАНИХ КРИСТАЛІЗАТОРІВ ЕШП ТА МБЛЗ

Л. Б. Медовар¹, Є. О. Педченко¹, А. В. Сибір², Є. О. Волченко¹, Д. В. Коломієць¹

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національна металургійна академія України.

49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Обговорено вплив теплопровідності матеріалів водоохолоджуваних кристалізаторів ЕШП та МБЛЗ на процес тверднення металу. На прикладі високовуглецевої сталі розраховані профілі температурних полів в кристалізаторах діаметром 400 мм з міді і жароміцної бронзи. Показано, що ефект зниження теплопровідності при заміні міді на бронзу незначно впливає на тверднення злитка ЕШП і безперервнолітої заготовки. Бібліогр. 8, табл. 1, іл. 2.

Ключові слова: кристалізатор; електрошлаковий переплав; безперервна розливка; теплопровідність; зносостійкість

ON THE PROBLEM OF SELECTION OF MATERIALS FOR WATER-COOLED MOULDS OF ESR AND MCCB

L.B. Medovar, E.A. Pedchenko, A.V. Sibir, Ye.A. Volchenko, D.V. Kolomiets

¹E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.

11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²The National Metallurgical Academy of Ukraine.

4 Gagarin Ave., 49600, Dnegr, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

Effect of heat conductivity of materials of water-cooled moulds of ESR and MCCB on the process of metal solidification is discussed. Temperature fields of molten metal pool of ingots of high-carbon steel in 400 mm diameter moulds of copper and heat-resistant bronze are calculated. It is shown that the effect of heat conductivity reduction in replacement of copper by bronze has a negligible influence on the solidification of ESR ingot and continuously cast billet. Ref. 8, Table 1, Figures 2.

Key words: mould; electroslag remelting; continuous casting; heat conductivity; wear resistance

Поступила 27.02.2017