

**А. С. Нурадинов, А. В. Ноговицын, И. А. Нурадинов,
В. П. Школяренко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Методом физического моделирования исследовано влияние скорости движения теплоносителя в кристаллизаторе на параметры теплообмена. Проведен теоретический анализ теплообмена между втулкой кристаллизатора и охлаждающей водой. Определены возможные способы интенсификации теплоотвода охлаждающей водой в кристаллизаторе МНЛЗ.

Ключевые слова: кристаллизатор МНЛЗ, охлаждающая вода, скорость движения, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, количество тепла, гидравлический напор.

Методом фізичного моделювання досліджено вплив швидкості руху теплоносія в кристалізаторі на параметри теплообміну. Проведено теоретичний аналіз теплообміну між втулкою кристалізатора і охолоджуючою водою. Визначено можливі способи інтенсифікації тепловідведення охолоджуючою водою в кристалізаторі МБЛЗ.

Ключові слова: кристалізатор МБЛЗ, охолоджуюча вода, швидкість руху, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, кількість тепла, гідралічний напір.

The impact of coolant's speed in the crystallizer on the heat transfer parameters was studied by the method of the physical modeling (simulation). A theoretical analysis of the heat transfer between the crystallizer's sleeve and the cooling water was carried out. The possible ways of heatsink intensification by the cooling water in the crystallizer of CCM were determined.

Keywords: crystallizer CCM, cooling water, traveling speed, heat transfer, heat irradiation coefficient, the amount of heat, hydraulic head.

Необходимость рассмотрения теплофизических и теплообменных процессов при непрерывном литье определяется тем, что главным образом от знания закономерностей теплообменных процессов в кристаллизаторах зависит качество отливаемых заготовок, аварийность (прорывы жидкой стали через затвердевшую корку) при разливке и производительность МНЛЗ. Поэтому актуальность тепло-технического обоснования рациональных режимов теплоотвода в кристаллизаторе не вызывает сомнения и особое значение оно приобретает при разливке непрерывнолитых стальных заготовок крупного сечения, в которых глубина лунки жидкого металла достигает двух-трех десятков метров.

Ранее авторами исследованы особенности отвода тепла от жидкого металла через затвердевшую корку и газовую прослойку к стенке кристаллизатора [1-5]. В настоящей работе изучены особенности теплообмена между стенкой кристаллизатора и охлаждающей водой, а также рассмотрены способы интенсификации этих процессов.

Для проведения экспериментов разработана и изготовлена лабораторная установка (рис. 1), которая состоит из бака с мерной шкалой (1), с которого вода (теплоноситель) при помощи насоса (2) через расходомер (3) подается к кристаллизатору (4). Внутри кристаллизатора с зазором 0,5 мм от внутренней стенки установлен электрический тэн (5), который нагревается до температуры 815 ± 2 °С и имитирует непрерывнолитую заготовку. От кристаллизатора вода через патрубки подается обратно в бак. Скорость движения теплоносителя в закрытых каналах

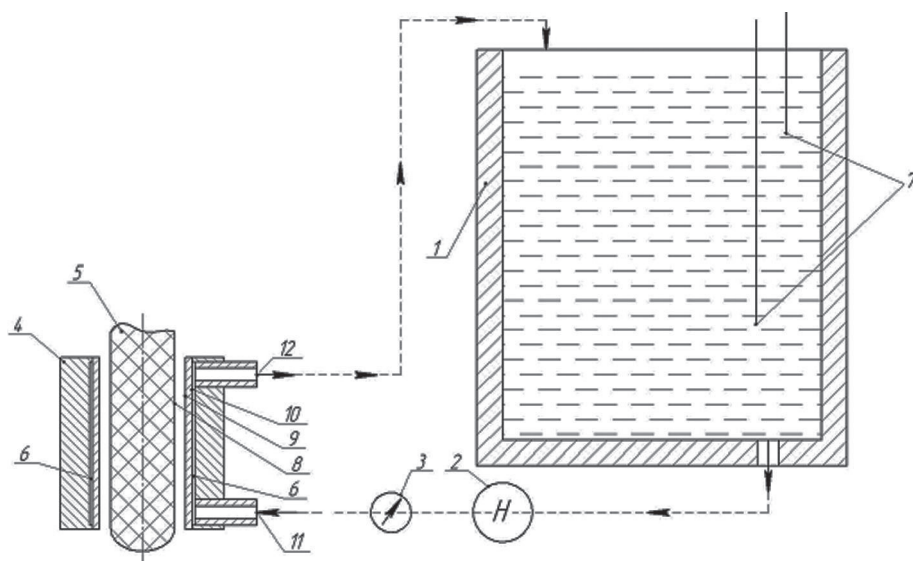


Рис. 1. Схема лабораторной установки

кристаллизатора (6) регулируется в широких пределах, меняя производительность центробежного насоса. Если расход воды в регулируемых пределах перевести в скорость ее движения в канале кристаллизатора, получаются значения от 0 до 6 м/с.

Изменения температуры воды в баке фиксируются двумя термопарами (7), установленными на разных уровнях по высоте (за расчетную температуру берется средняя температура между показаниями двух термопар). Температуры электрического тэна, внутренней и наружной поверхностей втулки кристаллизатора контролируются, соответственно, термопарами (8), (9) и (10). При необходимости температуры воды на входе и выходе из кристаллизатора фиксируются термопарами (11) и (12).

Прежде чем приступить к анализу результатов экспериментальной части работы, рассмотрим теоретические основы процесса теплообмена между кристаллизатором и охлаждающей водой.

В общем случае количество тепла (Q), получаемое водой в баке, можно определить по известной формуле [6]:

$$Q = m \cdot C(T_k - T_n), \quad (1)$$

где m – масса воды в баке; C – удельная теплоемкость воды; T_k и T_n – конечная и начальная температуры воды в баке.

С другой стороны процесс передачи тепла от жидкой стали к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ можно представить как теплопередачу через плоскую стенку (рис. 2). Стенка с одной стороны подвергается тепловому воздействию жидкой стали, а с другой – воздействию охлаждающей воды [7]. В таком случае количество тепла (Q), передаваемого охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ можно определить по следующей формуле [7, 8]:

$$Q = q \cdot F \cdot \tau = \alpha_b \cdot (T_1 - T_2) \cdot F \cdot \tau, \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока; F – площадь поверхности теплообмена; τ – время пребывания металла в кристаллизаторе; α_b – коэффициент теплоотдачи воды; T_1 и T_2 – температуры внутренней и наружной сторон теплоотводящей стенки кристаллизатора.

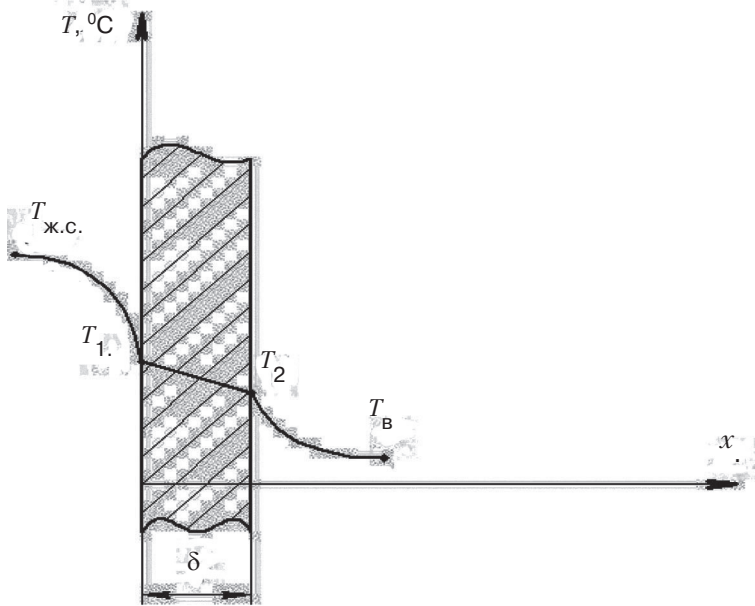


Рис. 2. Схема передачи тепла через внутреннюю стенку кристаллизатора МНЛЗ: $T_{ж.с.}$ – температура жидкой стали; T_1 – температура внутренней стенки втулки кристаллизатора; T_2 – температура наружной стенки втулки кристаллизатора; $T_в$ – температура охлаждающей воды; δ – толщина стенки втулки кристаллизатора

Если рассматривать все стадии передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде, то плотность теплового потока (q), можно выразить формулой [7, 8]:

$$q = \frac{T_{кр} - T_в}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}, \quad (3)$$

где $T_{кр}$ и $T_в$ – температуры кристаллизации металла и охлаждающей воды соответственно; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 – термические сопротивления отдельных стадий процесса теплопередачи, а именно: $R_1 = \frac{1}{\alpha_c}$ – теплоотдачи от жидкого металла к

затвердевшей корке; $R_2 = \frac{\xi}{\lambda}$ – теплопроводности затвердевшей корки металла;

$R_3 = \frac{1}{\alpha_2}$ – теплоотдачи через газовую прослойку между поверхностью заготовки

и стенкой кристаллизатора; $R_4 = \frac{\delta}{\lambda_m}$ – теплопроводности медной стенки кристал-

лизатора; $R_5 = \frac{1}{\alpha_в}$ – теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждаю-

щей воде.

Из анализа формулы (2) очевидно, что для увеличения количества тепла, отводимого охлаждающей водой в кристаллизаторе, необходимо повысить плотность

теплового потока. Но плотность теплового потока, согласно формуле (3), зависит от многих факторов на разных стадиях передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде. Так, термическое сопротивление затвердевшей корки металла зависит только от теплофизических свойств марки стали и, соответственно, изменить его невозможно. Термическим сопротивлением медной стенки кристаллизатора практически можно пренебрегать из-за незначительности его величины, которая составляет не более 3 % от общего термического сопротивления [9]. Возможность интенсификации теплопередачи от жидкого металла к затвердевшей корке и от поверхности заготовки через газовую прослойку к стенке кристаллизатора авторами изучено в работах [1-5].

Рассмотрим возможность снижения термического сопротивления при передаче тепла от поверхности медной стенки кристаллизатора к теплоносителю. Очевидно, что интенсифицировать этот процесс можно двумя способами: повышением коэффициента теплоотдачи охлаждающей воды (α_v) и увеличением площади поверхности теплообмена. В настоящей работе изучен один из вариантов повышения коэффициента теплоотдачи охлаждающей воды путем увеличения скорости ее движения.

Для небольших и умеренных скоростей движения теплоносителя (вязкостно-гравитационный режим) зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости можно определить из следующего критериального уравнения [10]:

$$Nu = 0,17 \cdot (Re \cdot Pr)^{0,33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} (Pr / Pr_c)^{0,25} \quad (4)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re = W \cdot l / \nu$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \nu / \alpha$ – критерий Прандтля; $Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$ – критерий Грассгофа.

При вязкостно-гравитационном режиме движения теплоносителя значения критериев Pr и Gr можно считать идентичными, тогда из уравнения (4) следует:

$$Nu \sim Re^{0,3} \text{ или } \alpha \sim W^{0,33}. \quad (5)$$

То есть увеличение скорости движения теплоносителя (W), к примеру, с W_1 до W_2 приведет к повышению коэффициента теплоотдачи в n_α раз и будет пропорционально отношению скоростей в степени 0,33:

$$n_\alpha = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0,33} \quad (6)$$

Для высоких скоростей движения теплоносителя (турбулентный режим) коэффициент теплоотдачи определяется из критериального уравнения [10]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (7)$$

Для этого случая можно считать $\alpha \sim W^{0,8}$, тогда увеличение коэффициента теплоотдачи (n_α), вызванное повышением скорости движения теплоносителя с W_1 до W_2 , будет пропорционально отношению скоростей в степени 0,8:

$$n_{\alpha} \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0,8} . \quad (8)$$

Из анализа формул (2), (6) и (8) следует, что для повышения количества отводимого тепла в 2-3 раза необходимо, при прочих равных условиях, увеличить скорость движения теплоносителя в 9-27 раз.

С другой стороны, увеличение скорости движения теплоносителя приводит к повышению потерь гидравлического напора, что обуславливает дополнительные затраты энергии на преодоление сил трения. В общем случае потери гидравлического напора (ΔP) на преодоление сил трения определяются из формулы [11]:

$$\Delta P = \xi_m \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2}, \quad (9)$$

где ξ_m – коэффициент гидравлического трения; ρ – плотность теплоносителя.

Для ламинарного режима движения теплоносителя коэффициент гидравлического трения определяется формулой Пуазейля [11]:

$$\xi_m = \frac{64\varphi}{Re}, \quad (10)$$

где φ – коэффициент, зависящий от формы канала.

При турбулентном режиме движения теплоносителя коэффициент гидравлического трения определяется формулой Блазиуса [11]:

$$\xi_m = \frac{0,3164}{Re}, \quad (11)$$

Анализ формул (6)-(11) показывает, что повышение коэффициента теплоотдачи в 2-3 раза путем увеличения скорости движения теплоносителя (в зависимости от режима движения) приводит к резкому росту потерь гидравлического напора на преодоление сил трения (в 5-21 раз). Это означает, что способ ускорения теплоотвода в кристаллизаторе МНЛЗ путем повышения скорости движения теплоносителя на практике может оказаться технически труднореализуемым и экономически нецелесообразным.

В результате проведенных экспериментов для разных скоростей движения охлаждающей воды в кристаллизаторе (от 0,5 до 6 м/с) при прочих равных условиях ($T_m = 815 \pm 2$ °С и $\tau = 30$ мин) по формуле (1) определено количество тепла, получаемое охлаждающей водой, а из выражений (2), (9)-(11) – коэффициенты теплоотдачи и потери гидравлического напора.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента теплоотдачи охлаждающей воды и отводимого ею количества тепла в зависимости от скорости движения. Видно, что, несмотря на практически одинаковый характер зависимости этих параметров от скорости движения воды, степень их роста существенно отличается. Так, коэффициент теплоотдачи воды при десятикратном увеличении ее скорости повышается в 2,7 раза (рис. 3, а), в то время как количество тепла – всего в 1,5 раза (рис. 3, б).

Полученные экспериментальные данные и рассчитанные по ним параметры теплообмена между охлаждающей водой и кристаллизатором отражены в таблице.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение скорости движения теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ действительно повышает и коэффициент теплоотдачи охлаждающей воды, и количество тепла, получаемое ею. Обращает на

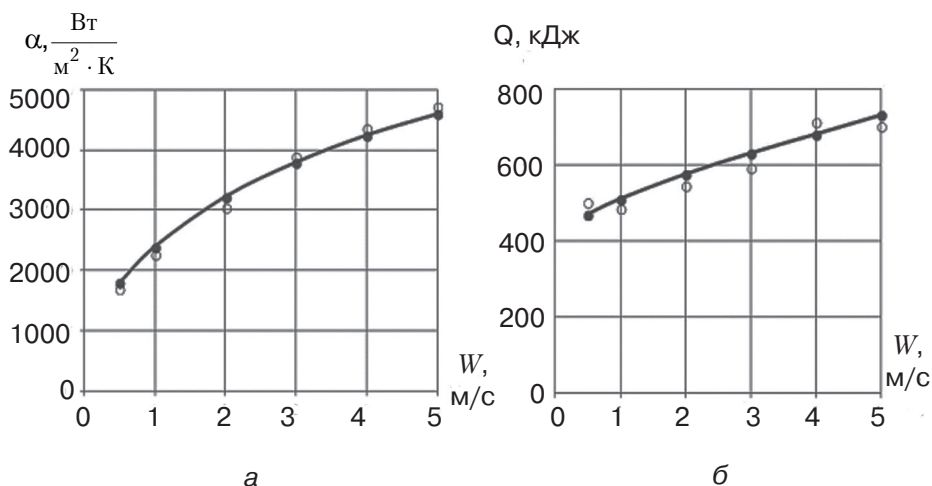


Рис. 3. Влияние скорости движения охлаждающей воды на коэффициент теплоотдачи (а) и количество отводимого ею тепла (б)

Параметры теплообмена между охлаждающей водой и кристаллизатором

$T_m, ^\circ\text{C}$	$W, \text{ м/с}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ мин}$	$Q, \text{ кДж}$	$\alpha, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$\Delta P, \text{ кПа}$
815±2	0,5	22,0	33,7	30	489,3	1835	995
		21,7	33,5		493,5	1846	
	1,0	22,3	35,1		535,3	2450	2189
		22,7	35,6		539,5	2463	
	2,0	24,8	38,1		556,2	3320	4374
		22,5	36,0		564,5	3331	
	3,0	21,4	36,5		631,5	3987	6568
		22,0	36,9		623,1	3971	
	4,0	19,9	36,5		694,2	4550	8756
		21,3	37,7		685,8	4542	
	5,0	21,9	39,4		731,9	5045	10935
		21,2	38,8		736,0	5051	

себя внимание тот факт, что десятикратное увеличение скорости движения воды с 0,5 до 5,0 м/с приводит к росту отводимого тепла всего на 50% (то есть в 1,5 раза). При этом значения потерь гидравлического напора на преодоление сил трения увеличиваются до 11 раз. На практике это будет означать необходимость установки мощных насосов для обеспечения требуемых скоростей движения теплоносителя в кристаллизаторе. Известно, что для капельных жидкостей (к каковым относится и вода) оптимальная скорость движения теплоносителя, в зависимости от конструкции теплообменного аппарата, составляет 1,5-2,0 м/с. В современных кристаллизаторах МНЛЗ скорость движения охлаждающей воды составляет 10-12 м/с, что примерно в 5-6 раз превосходит оптимальное значение. Это означает, что кристаллизатор как теплообменный аппарат с точки зрения экономики работает в неоправданном режиме. Дальнейшее увеличение скорости движения воды еще в большей степени усугубит эту проблему.

Таким образом, рассмотренный вариант интенсификации теплоотвода в кристаллизаторе МНЛЗ путем увеличения скорости движения охлаждающей воды требует больших энергетических затрат на его реализацию. Это приведет к резкому повышению давления в кристаллизаторе и, как следствие, к повышенным механическим требованиям ко всей конструкции системы охлаждения в целом.



Список литературы

1. Нурадинов А. С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. – 2006. – № 7. – С. 34-37.
2. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51-52.
3. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывнолитой заготовки // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 34-38.
4. Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Саипова Л. Х-А., Нурадинов И. А. Интенсификация теплообмена через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2016. – №4. – С. 8-11.
5. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Дымнич А. Х., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 42-51.
6. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. – Киев: Наукова Думка, 1989. – 864 с.
7. Дымнич А. Х., Троянский А. А. Вопросы теплообмена в сталеплавильных процессах. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – 582 с.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 414 с.
9. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
10. Михеев М. А. Основы теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.
11. Шебалин О. Д. Физические основы механики и акустики. – М.: Высшая школа, 1981. – 261 с.



References

1. Nuradinov A. S. (2006) *Teploobmennye protsessy pri formirovani nepreryvnolytykh zagotovok* [Heat transfer processes in the formation of continuously cast billets]. *Liteyshchik Rossii*, no. 7, pp. 34-37. [in Russian].
2. Nuradinov A. S., Eldarkhanov A. S., Taranov Ye. D. (2006) *Teploobmennye protsessy pri formirovani NLZ v pole uprugikh kolebaniy* [Heat transfer processes in the formation of NLZ in the field of elastic vibrations]. *Stal*, no. 6, pp. 51-52. [in Russian].
3. Nuradinov A. S., Eldarkhanov A. S., Taranov Ye. D. (2011) *Vliyanie vibratsii na teplofizicheskie usloviya formirovaniya nepreryvnolitoi zagotovki* [The impact of vibration on the thermal conditions of formation of continuous casting]. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 34-38. [in Russian].
4. Eldarkhanov A. S., Nuradinov A. S., Saipova L. Kh-A., Nuradinov I. A. (2016) *Intensifikatsiya teploobmena cherez gazovyy zazor v kristallizatore MNLZ* [Enhancement of heat transfer through the gas gap in the mold of MNLZ]. *Stal*, no. 4, pp. 8-11. [in Russian].
5. Nuradinov A. S., Eldarkhanov A. S., Dymnich A. Kh., Nogovitsyn A. V., Nuradinov I. A. (2016) *Sposob optimizatsii teplovoy raboty kristallizatora MNLZ* [Method of optimizing the thermal work of the crystallizer]. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 42-51. [in Russian].
6. Kuzmichev V. Ye. (1989) *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev: Naukova Dumka, 864 p. [in Russian].

Новые методы и прогрессивные технологии литья

7. Dymnich A. Kh., Troyanskiy A. A. (2009) Voprosy teplomassoobmena v staleplavilnykh protsessakh [Questions heat and mass transfer in steelmaking processes]. Donetsk: DVNZ «DonNTU», 582 p. [in Russian].
8. Kutateladze S. S. (1979) Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow: Atomizdat, 414 p. [in Russian].
9. Yefimov V. A., Eldarkhanov A. S. (2004) Tekhnologii sovremennoy metallurgii [Technology modern metallurgy]. Moscow: Novye tekhnologii, 784 p. [in Russian].
10. Mikheev M. A. (1956) Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Gosenergoizdat, 392 p. [in Russian].
11. Shebalin O. D. (1981) Fizicheskie osnovy mekhaniki i akustiki [Physical bases of mechanics and acoustics]. Moscow: Vysshaya shkola, 261 p. [in Russian].

Поступила 26.01.2017



ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ

Ведущий украинский научно-технический журнал по литейному производству и металлургии

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины с 1992 г. издает (6 раз в год) научно-технический журнал "Процессы литья" на русском языке. Журнал пользуется широкой популярностью среди научных и инженерно-технических работников металлургической и машиностроительной промышленности, литейного производства, а также работников вузов и научно-исследовательских институтов. Он получил широкое распространение в Украине и за рубежом.

В журнале публикуются научно-технические статьи, рекламные материалы и коммерческие сообщения.

Признавая ведущую роль в науке фундаментальных исследований, в журнале представлены следующие научные направления:

- Гидродинамика процессов литья;
- Теплофизика затвердевания сплавов;
- Массоперенос, кристаллизация и структурообразование сплавов;
- Внешние воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл;
- Металло- и материаловедение;
- Новые прогрессивные технологии литья;
- Получение и подготовка расплавов к разливке;
- Проблемы технологии формы;
- Специальные способы литья;
- Коммерческие сообщения.

В редакцию подается статья, распечатанная на любом принтере, а также на электронных носителях с материалом для опубликования. Срок выхода статьи с момента поступления в редакцию журнала – 3 месяца.

Для публикации в журнале рекламно-информационных материалов необходимо направить в редакцию журнала гарантийное письмо, в котором следует указать желаемый формат и место их размещения с приложениями текста и иллюстративных материалов (фото, рисунки и др.).

Подписаться на журнал Вы можете через редакцию журнала (стоимость журнала – 65 грн.). Для этого необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции для оформления счета-фактуры. Вы также можете приобрести электронную версию журнала.

АДРЕС РЕДАКЦИИ: Украина, 03142, Киев-142, б-р Вернадского 34/1, тел.: (044) 424-04-10; факс: (044) 424-35-15; E-mail: metal@ptima.kiev.ua; proclit@ptima.kiev.ua