

УДК 536.24:66.065.5

А. С. Нурадинов, д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр., e-mail: nla_73@ukr.net

А. В. Ноговицын, д-р техн. наук, зам. директора,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

И. А. Нурадинов, ведущ. инженер, e-mail: inuradinov@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Методом физического моделирования изучены процессы теплообмена между затвердевающим металлом и кристаллизатором машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) при непрерывной разливке стали. Установлены закономерности изменения количества тепла, передаваемого от жидкого металла к затвердевшей корке, от поверхности заготовки к стенке кристаллизатора и от нее к охлаждающей воде. Предложены практические рекомендации для повышения эффективности теплоотдачи для указанных стадий передачи тепла от затвердевающего металла к охлаждающей воде.

Ключевые слова: кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), теплообмен, газовый зазор, вибрация, искусственная шероховатость, коэффициент теплоотдачи, количество тепла.

Изучение процессов тепло- и массообмена является одним из важнейших направлений современной науки и знание закономерностей их протекания имеет большое практическое значение, в том числе для металлургических технологий. К примеру, при непрерывной разливке стали особо важными становятся вопросы интенсификации тепло- и массообменных процессов в кристаллизаторе МНЛЗ, потому что от них зависят и качество литых заготовок, и производительность процесса. В связи с этим, создание новых, более надежных методов расчета теплообменных процессов в кристаллизаторе является актуальной проблемой. Для данного конкретного случая наиболее надежным методом исследований является лабораторный эксперимент, который проводился авторами на эксклюзивных установках индивидуального изготовления.

В общем виде процесс отвода тепла от жидкой стали к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ можно представить как процесс, состоящий из различных стадий теплопередачи (рис. 1) [1]. В таком случае общее количество тепла (Q), передаваемого охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ, можно определить по формуле [2]:

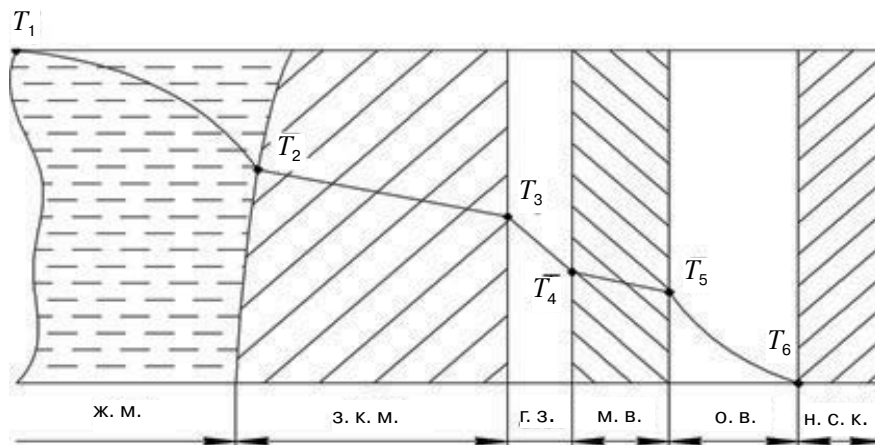


Рис. 1. Схема передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ: ж. м. – жидкий металл; з. к. м. – затвердевшая корка металла; г. з. – газовый зазор; м. в. – медная втулка кристаллизатора; о. в. – охлаждающая вода; н. с. к. – наружная стенка кристаллизатора; T_1 – температура жидкого металла; T_2 и T_3 – температуры внутренней и наружной поверхностей затвердевшей корки; T_4 и T_5 – температуры внутренней и наружной поверхностей медной втулки кристаллизатора; T_6 – температуры наружной стенки кристаллизатора

$$Q = q \cdot F \cdot \tau, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока; F – площадь поверхности теплообмена; τ – время пребывания металла в кристаллизаторе.

Плотность теплового потока (q), если рассматривать все стадии передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде, можно выразить формулой [1]:

$$q = \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}, \quad (2)$$

где $T_{\text{кр}}$ – средняя температура жидкого металла в кристаллизаторе и $T_{\text{в}}$ – температура охлаждающей воды; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 – термические сопротивления отдельных стадий процесса теплопередачи, а именно: $R_1 = 1/\alpha_c$ – теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке (α_c – коэффициент теплоотдачи жидкого металла); $R_2 = \xi/\lambda$ – теплопроводности затвердевшей корки металла (ξ – толщина корки металла, λ – коэффициент теплопроводности металла); $R_3 = 1/\alpha_r$ – теплопередачи через газовую прослойку между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора (α_r – коэффициент теплоотдачи газовой прослойки); $R_4 = \delta/\lambda_{\text{т}}$ – теплопроводности медной стенки кристаллизатора (δ – толщина медной стенки, $\lambda_{\text{т}}$ – коэффициент теплопроводности меди); $R_5 = 1/\alpha_{\text{в}}$ – теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде ($\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи охлаждающей воды).

Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$Q = \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \cdot F \cdot \tau. \quad (3)$$

Из (3) следует, что для увеличения количества тепла, отводимого охлаждающей водой в кристаллизаторе, необходимо снизить термические сопротивления на каждой стадии передачи тепла. Так, термическое сопротивление затвердевшей

корки металла зависит только от теплофизических свойств марки стали и, соответственно, снизить его невозможно, а термическим сопротивлением медной стенки кристаллизатора можно пренебречь из-за незначительности его величины, которая составляет не более 3 % от общего термического сопротивления [3]. Остальными стадиями передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде можно управлять различными приемами внешнего физического воздействия, что будет рассмотрено ниже, отдельно для каждой стадии.

Теплоотдача от жидкого металла к затвердевшей корке. В расчетах теплообмена при движении жидких металлов вдоль вертикального фронта затвердевания пользуются критериальным уравнением С. С. Кутателадзе, которое включает следующие параметры [2]:

$$Nu = 0,42 \left(\frac{Wh}{a} \right)^{0,65}, \quad (4)$$

где $Nu = \alpha \cdot l / \lambda$ – критерий Нуссельта; W – скорость конвекции металла; h – высота фронта затвердевания (в нашем случае – высота кристаллизатора); a – коэффициент температуропроводности расплава.

При заданных значениях геометрических размеров кристаллизатора и теплофизических характеристиках стали, величина критерия Нуссельта и, соответственно, интенсивность теплопередачи к затвердевшей корке будет зависеть от скорости конвекции расплава металла вдоль фронта кристаллизации:

$$Nu = 0,42 \left(\frac{Wh}{a} \right)^{0,65} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad \text{или} \quad \alpha \sim W^{0,65}. \quad (5)$$

То есть, увеличивая скорость движения затвердевающего металла в кристаллизаторе, можно повысить теплоотдачу расплава к затвердевшей корке. В наших исследованиях в качестве инструмента, с помощью которого усиливается перемешивания жидкого металла, использована вибрация с частотой $\nu = 0\text{--}100$ Гц и амплитудой $A = 0\text{--}2,5$ мм [4, 5].

Количество тепла, передаваемого от жидкого металла к затвердевшей корке, приближенно определяли по следующей формуле [2]:

$$Q_c = \alpha_c \cdot (T_{кр} - T_{пк}) \cdot F \cdot \tau, \quad (6)$$

где $T_{пк}$ – температура поверхности затвердевшей корки.

На рис. 2 показан характер изменения количества тепла, передаваемого жидким металлом затвердевшей корке, в среднем сечении кристаллизатора в зависимости от условий эксперимента. Видно, что вибрация вызывает существенное увеличение количества передаваемого тепла.

Интенсификация теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке под действием вибрации обусловлено тем, что она вызывает вынужденное движение расплава, к примеру, для частоты $\nu = 100$ Гц и амплитуды $A = 2,5$ мм, со скоростью около 0,25 м/с. Средняя скорость естественной конвекции жидкой стали, по данным различных авторов [3], равна 0,02–0,05 м/с. В этом случае соотношение критериев Нуссельта для вынужденной и естественной конвекций будет иметь следующий вид:

$$\frac{Nu_{виб}}{Nu_{кон}} = \left(\frac{0,25}{0,05} \right)^{0,65} \approx 2,5 \quad (7)$$

Из соотношения (7) становится понятной роль вибрации в интенсификации передачи тепла от жидкого металла к затвердевшей корке.

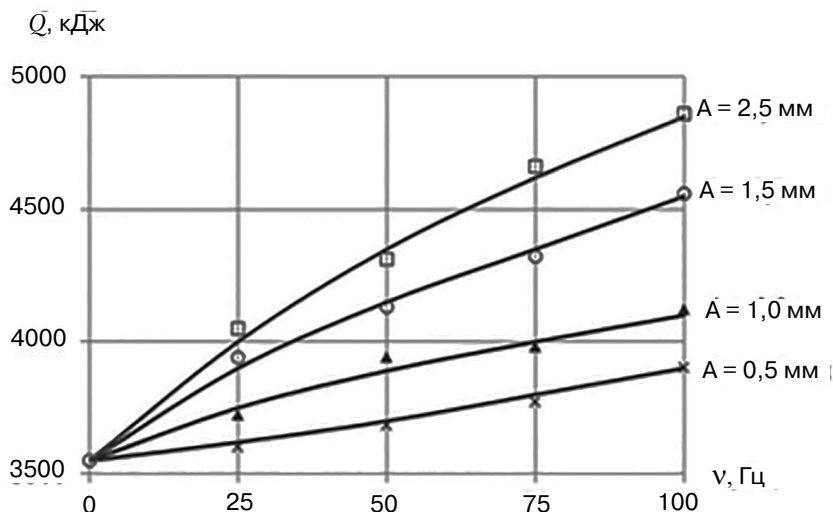


Рис. 2. Характер изменения количества тепла, передаваемого затвердевшей корке металла

Параметры теплообмена между жидким металлом и затвердевшей коркой, определенные прямыми замерами и рассчитанные по зависимостям (5 и 6), сведены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры теплообмена между жидким металлом и затвердевшей коркой

Параметр теплообмена	Параметры вибрации			
	v = 0 Гц	v = 50 Гц	v = 75 Гц	v = 100 Гц
	A = 0 мм	A = 1,5 мм	A = 2,0 мм	A = 2,5 мм
$T_{кр}, ^\circ\text{C}$	1560			
$T_{пк}, ^\circ\text{C}$	780	870	940	1050
$\alpha_c, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	1755	2544	2912	3650
$Q_c, \text{кДж}$	3550	4550	4680	4825

Из анализа табл. 1 видно, что вибрация повышает температуру поверхности затвердевшей корки ($T_{пк}$). Безусловно, это связано с повышением коэффициента теплоотдачи жидкого металла (α_c) и, как следствие, ростом количества тепла (Q), которое передается от расплава к затвердевшей корке. При оптимальных параметрах вибрации коэффициент теплоотдачи возрастает более 2 раз, а количество передаваемого тепла – до 35 %.

Теплопередача через газовую прослойку между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора. Если рассматривать теплообмен между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора как теплопередачу от более горячей поверхности к менее горячей, то полное количество тепла Q_r , проходящее через газовый зазор между ними, равно [3]:

$$Q_r = Q_{г} + Q_{л}, \quad (8)$$

где Q_{Γ} – количество тепла, передаваемое теплопроводностью и конвекцией; $Q_{\text{л}}$ – количество тепла, передаваемое лучеиспусканием.

Учитывая, что количество тепла, передаваемое лучеиспусканием $Q_{\text{л}}$ в условиях эксперимента не меняется и оно незначительно по сравнению с Q_{Γ} , им можно пренебречь. Тогда тепло, проходящее через газовый зазор за определенный промежуток времени, можно определить по формуле (6), которая для этой стадии теплопередачи будет иметь вид:

$$Q_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma} \cdot (T_{\text{ПК}} - T_{\text{МВ}}) \cdot F_{\text{ПК}} \cdot \tau, \quad (9)$$

где α_{Γ} – коэффициент теплопередачи через газовый зазор; $F_{\text{ПК}}$ – площадь поверхности заготовки в кристаллизаторе; $T_{\text{МВ}}$ – температура внутренней поверхности стенки кристаллизатора.

С другой стороны, количество тепла, полученное внутренней стенкой кристаллизатора ($Q_{\text{СК}}$) за то же время, можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{СК}} = m \cdot C \cdot (T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}}), \quad (10)$$

где m – масса стенки кристаллизатора, воспринимающей тепло; C – удельная теплоемкость материала стенки; $T_{\text{СК}}$ и $T_{\text{СН}}$ – конечная и начальная температуры стенки, воспринимающей тепло.

Если не учитывать потери тепла на лучеиспускание через открытую поверхность заготовки, то тепло, проходящее через газовый зазор Q_{Γ} , и тепло, полученное внутренней стенкой кристаллизатора $Q_{\text{СК}}$, согласно закону сохранения количества теплоты, должны быть равны между собой. Тогда, решая совместно уравнения (9) и (10), можно определить коэффициент теплопередачи через газовый зазор между поверхностями

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{m \cdot C \cdot (T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}})}{(T_{\text{СК}} - T_{\text{СН}}) \cdot F_{\text{ПК}} \cdot \tau}. \quad (11)$$

В данных исследованиях задача состояла в интенсификации теплопередачи через газовый зазор между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора, что было сделано авторами при помощи вибрации [6–8]. Об интенсивности теплопередачи через газовый зазор между двумя поверхностями можно судить по градиенту температур по толщине газового зазора между поверхностями (рис. 3). Из кривых изменения температур поверхностей теплообмена с начальными температурами 405 и 15 °С, соответственно, видно, что градиент температур существенно зависит от толщины зазора (сравните кривые 1, 1' и 2, 2'). Незначительное увеличение толщины зазора между поверхностями существенно ослабляет теплообменный процесс между ними, что наглядно видно из сравнения кривых 2, 2' (рис. 3). Даже к 15-й минуте процесса этот перепад температур составляет 150 °С, что говорит о серьезном термическом сопротивлении газовой прослойки между ними.

В условиях воздействия вибрации на кристаллизатор градиент температур по сечению газового зазора существенно уменьшается (сравните кривые 2, 2' и 3, 3', рис. 3), что свидетельствует об интенсификации теплообменных процессов между поверхностями. Если в контрольном эксперименте перепад температур между поверхностями к 15-й минуте составлял 150 °С, то под действием вибрации – всего 45 °С, что говорит о снижении термического сопротивления газовой прослойки. Подобный характер температурные кривые имели и для вариантов, когда толщина газового зазора составляла 0,3; 1,0; 1,5 и 2,0 мм.

Расчетные значения количества тепла, передаваемого через газовый зазор между поверхностями, представлены на рис. 4. Естественно, максимальное количество тепла передается к холодной поверхности при контактном теплообмене,

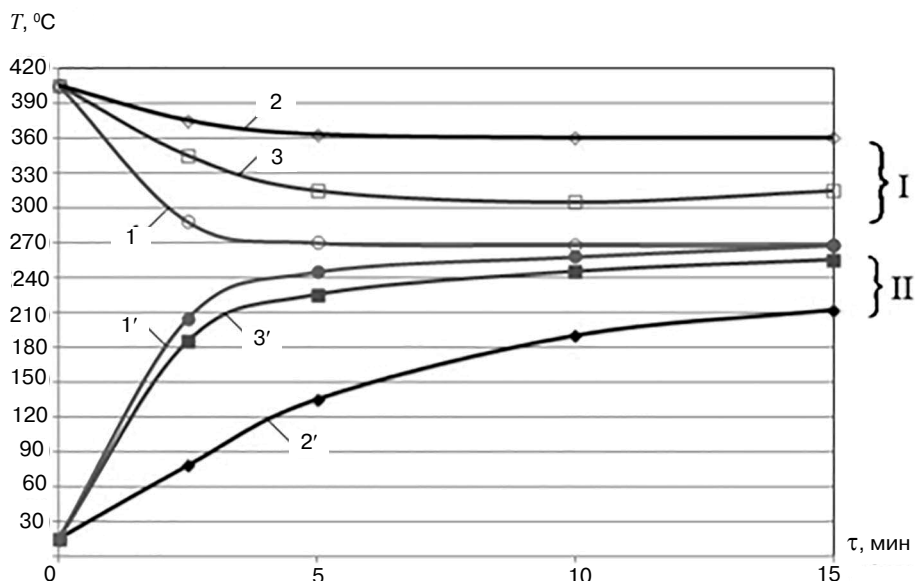


Рис. 3. Температурные кривые охлаждения (I) и прогрева (II) поверхностей: 1, 1' – $\delta = 0$; 2, 2' – $\delta = 0,6$ мм; 3, 3' – $\delta = 0,6$ мм с вибрацией

который, как известно, зависит от качества соприкасающихся поверхностей (то есть их шероховатости и прямолинейности). При увеличении толщины зазора между поверхностями от 0 до 1 мм количество передаваемого тепла резко снижается (кривая 1, рис. 4).

Существенное воздействие на передаваемое через газовый зазор тепло оказывает вибрация (кривые 2 и 3, рис. 4). Механизм воздействия вибрации, по мнению авторов, обусловлен двумя факторами: уменьшением толщины зазора под действием сил виброимпульса и изменением динамики движения газов в нем. Из данного рисунка видна явная зависимость эффективности воздействия вибрации на

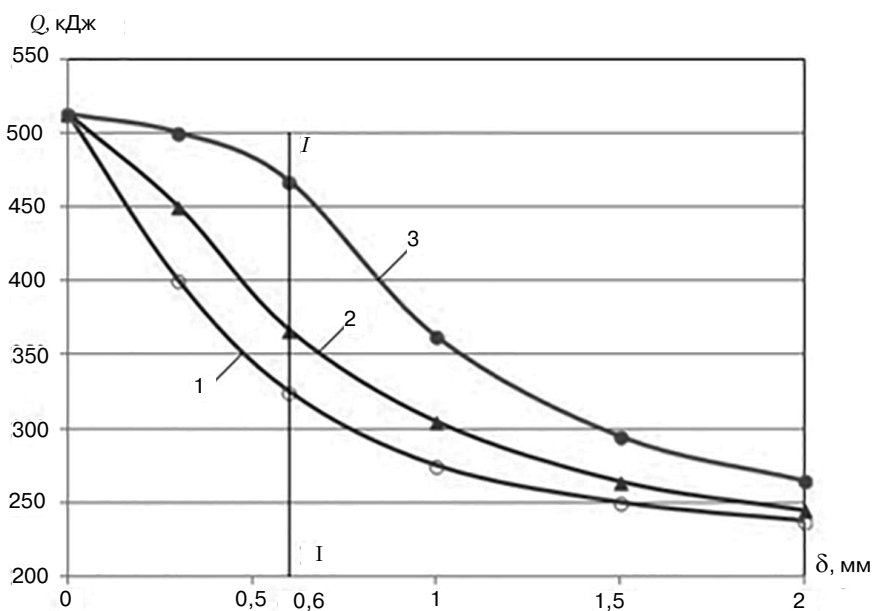


Рис. 4. Зависимость количества тепла, передаваемого через газовый зазор: 1 – без вибрации; 2 – при действии вибрации с ограничителями; 3 – при действии вибрации без ограничителей; параметры вибрации: $A = 0,6$ мм; $\nu = 60$ Гц

теплопередачу от толщины зазора, при этом максимальный эффект получен, когда амплитуда виброимпульса равна толщине зазора между поверхностями (вертикаль $I-I$, рис. 4). Важный вывод из рис. 4 заключается в том, что основным критерием при подборе оптимальных параметров вибрации для интенсификации теплообменных процессов между двумя поверхностями является равенство значений толщины газового зазора между ними и амплитуды вибрации.

Основные параметры теплообмена между поверхностями, рассчитанные по зависимостям (10, 11) к 10-й минуте процесса (то есть в момент наступления теплового равновесия между ними), сведены в табл. 2, из которой видно, что независимо от толщины зазора вибрация уменьшает перепад температур (ΔT_r) по сечению газовой прослойки между поверхностями и, наоборот, усиливает темп роста температуры поверхности (ΔT_2), воспринимающей тепло. При этом существенно повышается коэффициент теплопередачи (α_r) через газовый зазор (до 4,8 раза) и, как следствие, увеличивается количество тепла (Q_{ck}), которое передается от более горячей поверхности к холодной (до 42 %).

Таблица 2
Параметры теплообменного процесса между поверхностями

Параметр теплообмена	Толщина зазора δ , мм				
	0	0,3	0,6	1,0	1,5
$\Delta T_r = T_1 - T_2, ^\circ\text{C}$	$\frac{22*}{22}$	$\frac{151}{36}$	$\frac{178}{52}$	$\frac{228}{60}$	$\frac{252}{214}$
$\Delta T_2 = T_{2к} - T_{2н}, ^\circ\text{C}$	$\frac{259}{259}$	$\frac{183}{248}$	$\frac{168}{239}$	$\frac{135}{177}$	$\frac{125}{141}$
$\alpha_r = \frac{m \cdot C \cdot (T_{ck} - T_{ch})}{(T_{ck} - T_{ch}) \cdot F_{пк} \cdot \tau}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{1400}{1400}$	$\frac{750}{1060}$	$\frac{113}{551}$	$\frac{71}{132}$	$\frac{60}{79}$
$Q_{ck} = m \cdot C \cdot (T_{ck} - T_{ch}), \text{кДж}$	$\frac{528}{528}$	$\frac{373}{506}$	$\frac{343}{488}$	$\frac{275}{361}$	$\frac{255}{288}$

*Примечание: числитель – без вибрации; знаменатель – с вибрацией: $A = 0,6$ мм; $\nu = 60$ Гц

Теплоотдача с поверхности медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде.

Для интенсификации теплоотдачи с поверхности медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде нами использованы различные приемы: наведение искусственной шероховатости и ребер на поверхности теплообмена [9–12]. Для всех рассмотренных вариантов количество отводимого тепла в той или иной степени увеличивается, при этом наибольший эффект получается для поверхности с искусственной шероховатостью (рис. 5). Если рост количества отводимого водой тепла при продольных и винтообразных ребрах обусловлен элементарным увеличением площади теплообмена (согласно выражения (6)), то механизм интенсификации теплообменных процессов при искусственной шероховатости связан со структурой приграничного гидродинамического слоя.

Из теории пограничного слоя известно, что при набегании потока жидкости или газа на гладкую поверхность, на ней формируется приграничный гидродинамический слой с различной структурой по направлению течения и сечению (рис. 6) [1, 13].

При малых значениях числа Рейнольдса ($Re < 2 \cdot 10^5$) режим движения жидкости в приграничном слое имеет ламинарный характер (рис. 6, часть А), а при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ – турбулентный (рис. 6, часть В). Длина перехода от ламинарного режима к турбулентному ($X_{кр.}$) тем меньше, чем больше скорость движения жидкости. Для скоростей движения воды в кристаллизаторах МНЛЗ (от 10 до 12 м/с) ламинарный слой в потоке жидкости практически отсутствует. Даже в турбулентном слое всегда присутствует тонкий пристеночный вязкий подслой (рис. 6, область I), который существенным образом влияет на теплопередачу между поверхностью и жидкостью.

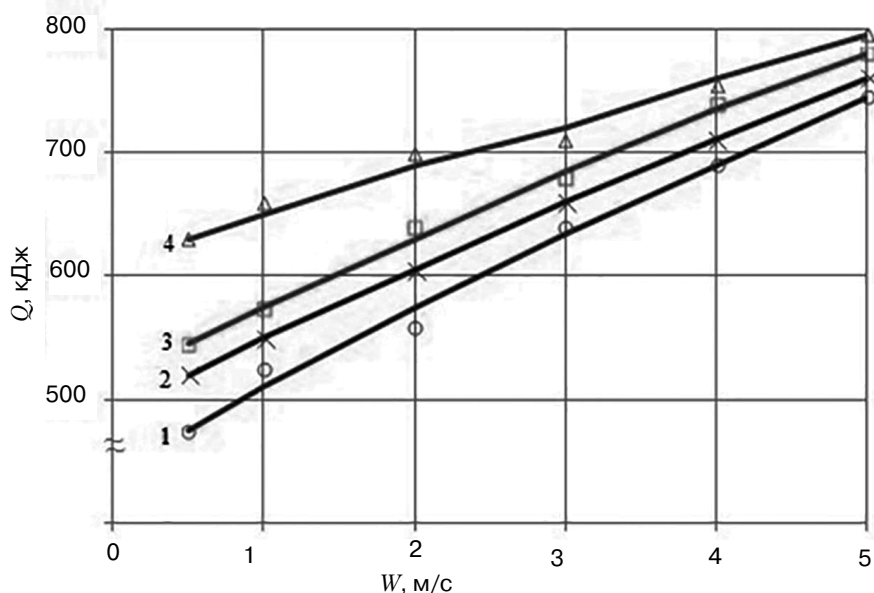


Рис. 5. Зависимость количества тепла, отводимого в кристаллизаторе охлаждающей водой: 1 – стандартная гладкая втулка; 2 – втулка с продольными ребрами; 3 – втулка с винтовыми ребрами; 4 – втулка с искусственной шероховатостью

Толщину турбулентного приграничного слоя можно определить из следующей зависимости [14, 15]:

$$\delta_T = \frac{0,37 \cdot X}{Re^{0,3}}, \quad (12)$$

где X – расстояние от точки набегающего потока жидкости на поверхность.

По данным различных источников, толщина вязкого подслоя составляет около 0,01 части от общей толщины турбулентного слоя [14, 15]. Из формулы (12) следует, что с удалением от верхней кромки кристаллизатора толщина турбулентного слоя увеличивается, соответственно, увеличивается и толщина вязкого подслоя.

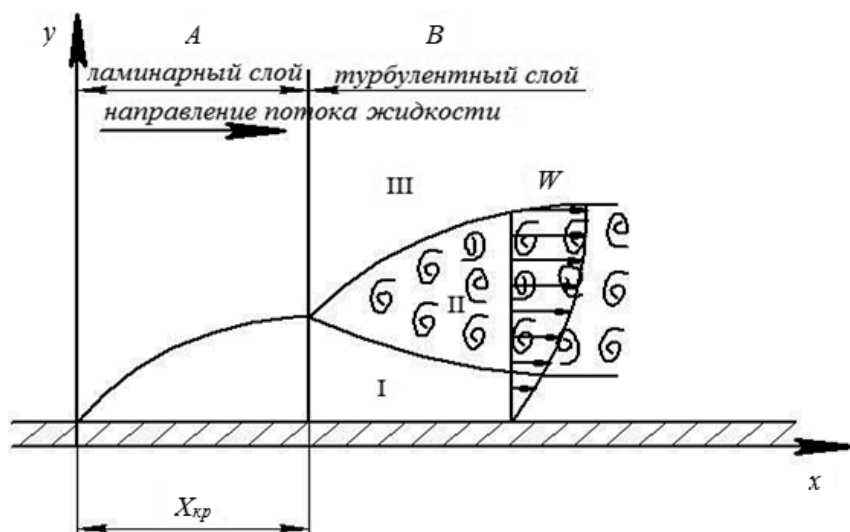


Рис. 6. Структура приграничного гидродинамического слоя потока воды

Если структуру турбулентного приграничного слоя рассматривать с позиции теплообмена между поверхностью и набегающей жидкостью, то можно заключить, что в вязком подслое (рис. 6, область I) тепло передается теплопроводностью, а в турбулентном подслое (рис. 6, область II) – конвекцией. Следовательно, в общем переносе тепла лимитирующей стадией является теплопередача теплопроводностью в вязком (ламинарном) подслое. Тогда коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{\text{в}}$) от поверхности теплообмена к потоку жидкости можно определить из следующего выражения:

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\delta_{\text{в.п.}}}, \quad (13)$$

где λ – теплопроводность жидкости (воды); $\delta_{\text{в.п.}} = 0,01 \delta_{\text{т}}$ – толщина подслоя.

Из формулы (13) следует, что для усиления отвода тепла от поверхности теплообмена к набегающей жидкости необходимо разрушить вязкий подслой или уменьшить его толщину.

Механизм повышения интенсивности теплоотдачи при искусственной шероховатости поверхности контакта заключается в том, что при набегании потока жидкости на выступ за ним образуется вихрь, который разрушает структуру вязкого подслоя, турбулизируя его (рис. 7). В результате этого при неизменной скорости движения жидкости вязкий подслой уменьшается по толщине или полностью разрушается, что способствует повышению коэффициента теплоотдачи без увеличения гидравлических потерь.

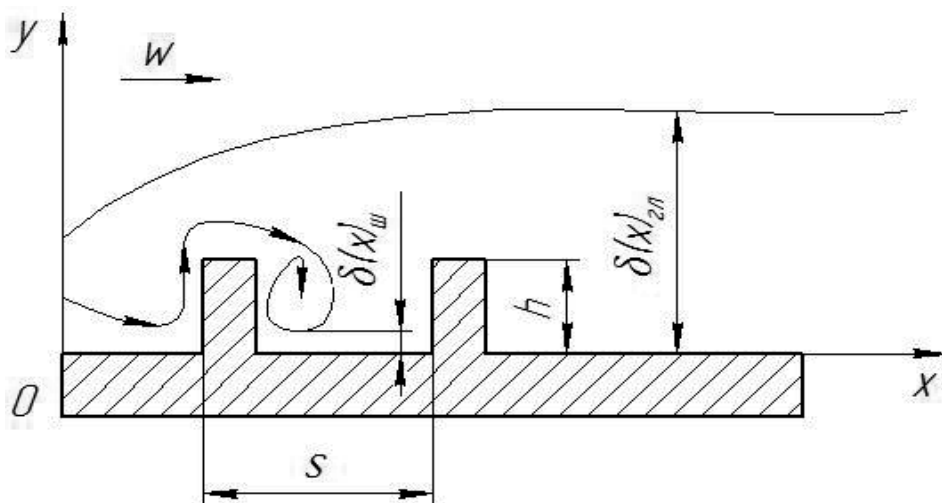


Рис. 7. Структура гидродинамического пограничного слоя при наличии искусственной шероховатости (выступов)

Чтобы шероховатость на поверхности теплообмена не сопровождалась увеличением гидравлических потерь, необходимо обеспечить следующие условия: высота выступа не должна превышать толщину вязкого подслоя в гидродинамическом пограничном слое; вихрь, который возникает за выступом, должен прекратить свое существование до встречи со следующим выступом (рис. 7), в противном случае он будет переходить в ядро потока и приведет к дополнительным гидравлическим потерям.

Полученные результаты показывают, что использованные приемы действительно повышают теплообмен между внутренней стенкой кристаллизатора и охлаждающей водой (табл. 3). Из рассмотренных приемов наибольший эффект получен для поверхности теплообмена с искусственной шероховатостью ($n_{\text{Qmax}} = 1,29$), то есть количество отводимого тепла увеличивается до 29 %, в то время как для ребристых поверхностей оно повышается максимум от 6 до 11 % в зависимости от типа ребер.

Таблица 3

Параметры теплообмена между охлаждающей водой
и кристаллизатором в зависимости от формы
теплоотводящей поверхности

W, м/с	α , Вт/м ² ·К		Q, кДж				n_q		
	г. п.	и. ш.	г. п.	и. ш.	п. р.	в. р.	и. ш.	п. р.	в. р.
0,5	1843	2378	492,8	635,7	525,4	546,2	1,29	1,06	1,11
1,0	2463	3054	539,5	668,4	549,7	566,6	1,24	1,02	1,05
2,0	3331	4031	564,5	694,1	593,5	618,4	1,21	1,05	1,09
3,0	3987	4505	631,5	715,0	643,2	663,5	1,13	1,02	1,05
4,0	4546	4909	694,2	752,8	700,0	716,5	1,08	1,01	1,03
5,0	5052	5305	737,7	778,3	747,5	760,2	1,05	1,01	1,03

Условные обозначения: г. п. – гладкая поверхность; и. ш. – искусственная шероховатость;
п. р. – продольные ребра; в. р. – винтообразные ребра

Таким образом, экспериментально доказано, что, используя различные приемы, можно интенсифицировать теплопередачу от жидкого металла к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ. Совершенно очевидно, что интенсификация теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей корке под действием вибрации обусловлена ростом скорости перемешивания затвердевающего расплава. А усиление теплообменных процессов между поверхностью заготовки и стенкой кристаллизатора обусловлено, во-первых, изменением характера и скорости движения газов в зазоре и, во-вторых, периодическим сокращением расстояния между ними под действием сил виброимпульса. Механизм интенсификации теплоотдачи от медной втулки кристаллизатора к охлаждающей воде при искусственной шероховатости ее поверхности связан со структурой приграничного гидродинамического слоя. При набегающем потоке жидкости на выступ за ним образуется вихрь, который разрушает структуру вязкого подслоя, турбулизируя его, в результате теплопередача теплопроводностью переходит в конвективный теплоотвод.

Список литературы

1. Дымнич А. Х., Троянский А. А. Вопросы тепломассообмена в сталеплавильных процессах. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – 582 с.
2. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 414 с.
3. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
4. Нурадинов А. С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. – 2006. – № 7. – С. 34–37.
5. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51–52.
6. 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.
7. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Дымнич А. Х. и др. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 42–51.
8. Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Ахтаев С. С.-С. и др. Методика определения коэффициента теплопередачи через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Грозненский естественно-научный бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 65–70.
9. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Уздиева Н. С. и др. Скорость движения теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ как фактор интенсификации теплообменных процессов в нем // Сталь. – 2017. – № 3. – С. 19–21.
10. Нурадинов А. С., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. и др. Методика определения коэффициента теплоотдачи теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ // Процессы литья. – 2017. – № 2. – С. 45–52.

11. Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Ахтаев С. С.-С. и др. Интенсификация теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2017. – № 5. – С. 21–25.
12. Нурадинов А. С., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. и др. Влияние формы поверхности теплообмена на эффективность тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2017. – № 3. – С. 43–51.
13. Скворцов А. А., Акименко А. Д., Ульянов В. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. – М.: Metallurgiya, 1991. – 216 с.
14. Боршанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976. – 146 с.
15. Кутателадзе С. С., Стирикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

Поступила 09.01.2019

References

1. Dymnich, A. H., Troyanskiy, A. A. (2009) Issues of heat and mass transfer in steelmaking processes. Donetsk: DVNZ «DonNTU», 582 s. [in Russian].
2. Kutateladze, S. S. (1979) Fundamentals of the theory of heat transfer. Moscow: Atomizdat, 414 s. [in Russian].
3. Yefimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (2004) Technologies of modern metallurgy. Moscow: Novyye tekhnologii, 784 s.[in Russian].
4. Nuradinov, A. S. (2006) Heat exchange processes in the formation of continuously cast billets. Liteyshchik Rossii, no. 7, pp. 34–37 [in Russian].
5. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Taranov, E. D. (2006) Heat exchange processes in the formation of continuous castings in the field of elastic oscillations. Stal, no. 6, pp. 51–52 [in Russian].
6. Eldarkhanov, A. S., Nuradinov, A. S., Saipova, L.H-A. et al. (2016) Intensification of heat transfer through the gas gap in the crystallizer of the CCM. Stal, no. 4, pp. 8–11 [in Russian].
7. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Dymnich, A. H. et al. (2016) Intensification of heat transfer through the gas gap in the crystallizer of the CCM. Protsessy litya, no. 2, pp. 42–51 [in Russian].
8. Nuradinov, A. S., Uzdiyeva, N. S., Akhtayev, S. S.-S. et al. (2016) Method of determining the heat transfer coefficient through the gas gap in the mold of the CCM. Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten, no. 2, pp. 65–70 [in Russian].
9. Nuradinov, A. S., Eldarkhanov, A. S., Uzdiyeva, N. S. et al. (2017) The speed of the coolant in the mold caster as a factor of intensification of heat exchange processes in it. Stal, no. 3, pp. 19–21 [in Russian].
10. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A. et al. (2017) Method of determining the heat transfer coefficient of the coolant in the mold of the CCM. Protsessy litya, no. 2, pp. 45–52 [in Russian].
11. Eldarkhanov, A. S., Nuradinov, A. S., Akhtayev, S. S.-S. et al. (2017) Intensification of heat transfer in the crystallizer of the CCM. Stal, no. 5, pp. 21–25 [in Russian].
12. Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A. et al. (2017) The influence of the shape of the heat exchange surface on the efficiency of the thermal operation of the CCM. Protsessy litya, no. 3, pp. 43–51 [in Russian].
13. Skvortsov, A. A., Akimenko, A. D., Ulyanov, V. A. (1991) The impact of external influences on the process of forming ingots and billets. Moscow: Metallurgiya, 216 s.[in Russian].
14. Borshanskiy, V. M., Kutateladze, S. S., Novikov, I. I. (1976) Liquid metal coolants. Moscow: Atomizdat, 146 s.[in Russian].
15. Kutateladze, S. S., Styrikovich, M. A. (1976)Hydrodynamics of gas-liquid systems. Moscow: Energiya, 296 s.[in Russian].

Received 09.01.2019

А. С. Нурадінов, д-р техн. наук, провідн. наук. співр., e-mail: nla_73@ukr.net

О. В. Ноговіцин, д-р техн. наук, заст. директора,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

І. А. Нурадінов, провідн. інженер, e-mail: inuradinov@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТІВОК

Методом фізичного моделювання вивчено процеси теплообміну між металом, що твердне, і кристалізатором машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при безперервному розливанні сталі. Встановлено закономірності зміни кількості тепла, що передається від рідкого металу до затверділої кірки, від поверхні заготовки до стінки кристалізатора і від неї до охолоджуючої води. Запропоновано практичні рекомендації для підвищення ефективності тепловіддачі для вказаних стадій передачі тепла від металу, що твердіє, до охолоджуючої води.

Ключові слова: кристалізатор машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), теплообмін, газовий зазор, вібрація, штучна шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі, кількість тепла.

A. S. Nuradinov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher,

e-mail: nla_73@ukr.net

A. V. Nogovitsyn, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

I. A. Nuradinov, Leading Engineer, e-mail: inuradinov@gmail.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

WAYS TO INTENSIFY HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE MOLD OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE

By the method of physical modeling, the processes of heat transfer between the solidified metal and the caster mold during continuous casting of steel are studied. The laws governing changes in the amount of heat transferred from the liquid metal to the solidified crust, from the surface of the workpiece to the wall of the mold and from it to the cooling water are established. Practical recommendations are proposed for increasing the efficiency of heat transfer for the indicated stages of heat transfer from the solidifying metal to the cooling water.

Keywords: caster mold, heat transfer, gas gap, vibration, artificial roughness, heat transfer coefficient, amount of heat.