

*к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина,
Skuberskiy@yandex.ru)*

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ, ОБОРУДОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕМ

С использованием результатов физического моделирования выполнен расчет основных гидравлических и электрических параметров промежуточного ковша МНЛЗ с электромагнитным перемешиванием металла для рафинирования его от неметаллических включений.

Ключевые слова: *промежуточный ковш, электромагнитное перемешивание, поток, давление, скорость, энергия, баланс, коэффициент расхода, магнитная индукция, сила тока.*

Во всем мире постоянно увеличивается доля стали разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Одной из основных проблем непрерывной разливки является необходимость дальнейшего повышения качества и уменьшения количества дефектов поверхности и внутренней структуры заготовки, что особенно важно для сталей, предназначенных для глубокой вытяжки и производства белой жести. На служебные свойства стальных изделий, в том числе, работающих в сложных условиях или получаемых путем интенсивной пластической деформации в холодном состоянии, существенное влияние оказывают даже малые концентрации вредных примесей, а также количество, размеры и характер расположения неметаллической фазы.

Этой проблемой серьезно занимаются во всем мире на протяжении уже многих лет, о чем свидетельствует тематика и содержание докладов европейских конференций и семинаров [1].

Важным технологическим элементом МНЛЗ, является промежуточный ковш, конструкция которого оказывает значительное влияние на качество металлопродукции. Первоначальные функции промежуточного ковша заключались в распределении стали по ручьям МНЛЗ, усреднении химического состава и поддержании стабильности разливки. Однако в настоящий момент его функции расширяются до функций универсального агрегата по доводке стали до требуемых кондиций. Известен целый ряд рево-

люционных решений, включающих подогрев стали и вакуумирование в промежуточном ковше, обработку стали порошковыми проволоками, применение электромагнитной сепарации и т.д. [2, 3]. Использование данных технологий в процессе разливки на МНЛЗ требует серьезных затрат материальных ресурсов, а также соответствующей конструкторской и научной базы, поскольку необходима замена типового промежуточного ковша на уникальный металлургический агрегат.

В настоящий момент наиболее перспективным для Украины направлением, является модернизация существующих, типовых промежуточных ковшей с учетом имеющихся у предприятий ресурсов. Работы отечественных и зарубежных исследователей, ведущиеся в этом направлении, связаны с интенсификацией процесса рафинирования стали, для чего, в первую очередь, требуется оптимизировать параметры течения расплава в промковше. Большое внимание уделяется вопросам защиты металла от вторичного окисления, на пути от разливочного ковша до кристаллизатора. Для этих целей используются погружные защитные трубы и стаканы, различные шлакообразующие покрытия, защищающие зеркало металла, герметизация ковша и т.д.

Оснащение ковшей специальными гидродинамическими устройствами позволяет оптимизировать параметры течения металла в агрегате и тем самым создать благоприятные условия для удаления неметаллических

включений из стали. Поэтому улучшение гидродинамики промежуточных ковшей за счет оснащения их различными гидродинамическими устройствами является актуальной задачей для всех металлургических заводов Украины.

В СНГ достаточно серьезно проблемой рафинирования стали в промежуточном ковше занимались и занимаются Ефимов В.А., Ефимов Г.В., Эльдарханов А.С., Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Белобров Ю.Н., Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх ИЛ., Либерман А.Л., Лякишев Н.П., Шалимов А.Г., Дубровин И.В., Коржавин В.А., Зубов В.А., Потапова Т.Н., Устинов А.И. и др. [2, 4-6]. Авторами разработано несколько способов интенсификации процесса рафинирования и достаточно широкий спектр рафинирующих устройств, включающий собственно гидродинамические устройства различной конструкции, фильтрующие элементы и устройства продувки расплавов инертными газами.

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам рафинирования стали в промежуточном ковше, критерии, по которым можно определить основные размеры таких устройств, до сих пор четко не обозначены. Поэтому актуальным направлением исследований является разработка новых теоретических подходов и методик проектирования и расчета рафинирующих устройств современных промежуточных ковшей.

Основная цель предложенной работы заключалась в разработке методики гидравлического расчета промковша МНЛЗ, оборудованного электромагнитным перемешивателем и основных электрических параметров установки для создания необходимых электромагнитных воздействий.

В качестве исходных данных принимались технологические параметры 60 т промковша двухручьевого слябовой МНЛЗ ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК»). Длительность разливки плавки в условиях ПАО «АМК» составляет 60-70 мин, среднее время течения металла от металлоприемника промковша до стакана-дозатора около 10 мин, а усредненная

скорость течения металла для этих условий составляет 0,005 м/с. Движущийся поток стали характеризуется числом $Re \approx 10^4$ т.е. является турбулентным. В зоне металлоприемника промковша турбулентность несколько больше ($Re \approx 10^5$). На пути движения потока в промковше устраивают решетки и (или) барботеры для флотации неметаллических включений в покровный шлак. Восходящие потоки создают адекватные нисходящие потоки, которыми неметаллические включения уносятся обратно в глубину потока стали, а также существует вероятность захвата шлаковых частиц из покровного шлака находящегося на поверхности зеркала металла в промковше. Кроме того, температура стали, поступающей в кристаллизаторы, за время разливки плавки может значительно изменяться из-за остывания металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах, а это отрицательно влияет как на ход разливки, так и на качество непрерывнолитого слитка.

В настоящее время, как было отмечено выше, нерешенными техническими задачами являются стабилизация температуры металла, поступающего в кристаллизаторы, и создание условий для более полного рафинирования стали от неметаллических включений.

Сотрудниками кафедры МЧМ ДонГТУ предложено оборудовать промковш электромагнитным перемешивателем (ЭМП) кондукционного типа [7]. ЭМП представляет собой отъемную футерованную ванну 1 (рисунок 1) с корпусом из неферромагнитной стали, расположенную в торце промковша между полюсами электромагнита.

Вдоль оси промковша в ванну ЭМП подводится постоянный ток I . Векторное произведение индукции магнитного поля B на плотность тока j образует в жидкости ванны ЭМП электромагнитное утяжеление g_e . При этом в жидкости создается электромагнитное (ЭМ) давление

$$P = \rho \cdot g_e \cdot H_1, \text{ Па},$$

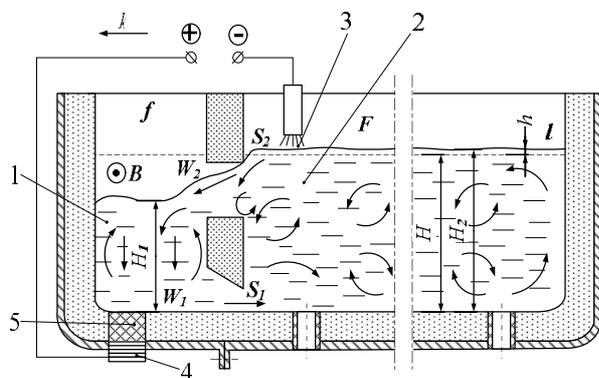
где ρ – плотность жидкости;

H_1 – глубина ванны.

ЭМ давлением из нижней части ванны 1 в ванну проковша выжимается поток жидкого металла со скоростью

$$W_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g_e \cdot H_1},$$

где φ – коэффициент расхода.



1 – ванна ЭМП; 2 – ванна ПК;
3 – токоподвод дугой; 4 – токосъемник;
5 – электропроводный огнеупор

Рисунок 1 – Электромагнитный перемешиватель для проковша МНЛЗ

В результате в нижней части ванны проковша образуется поток металла, который доходит до противоположного конца ванны 2, а возвратный поток перетекает обратно в ванну 1 ЭМП в поверхностных слоях металла. Эти встречные потоки разделены вихрями, сами состоят из вихрей и друг друга тормозят.

Особенность ЭМП для обработки жидкой стали заключается в том, что постоянный ток в ванну ЭМП вводится через электрическую дугу. Применение погружаемых токоподводящих элементов для стали исключается ввиду их влияния на химический состав металла. Металл в ванне обогревается электрической дугой. Поток стали, вытекающий из ЭМП со скоростью W_1 , разносит тепло по ванне проковша, чем решается техническая задача стабилизации температуры разливки и снижается вероятность образования застойных зон. Отказ от восходящих и нисходящих потоков металла в проковше и замена их горизонтальными увеличивает вероятность перехода неметаллических включений в по-

кровный шлак за счет увеличения площади и времени контакта стали с ним в несколько раз в зависимости от импульса скорости W_1 . Но на скорость литья горизонтальные потоки практически не влияют. Скорость течения металла в кристаллизаторы определяется глубиной ванны проковша, а именно H . Скорость верхнего и нижнего потоков W_x должна быть в пределах 0,05-0,1 м/с, чтобы неметаллические включения успели перейти в покровный шлак. Этим создаются условия для решения второй технической задачи – рафинирования стали от неметаллических включений.

На пути кругового потока расплава через ванны 1 и 2 происходят потери его энергии на трение и на местных сопротивлениях. Для поддержания оптимальной скорости кругового потока требуется постоянная компенсация потерь энергии. Компенсация достигается созданием достаточной величины g_e путем регулирования B и I . Баланс энергии кругового потока описывается выражением (1) [8]

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_i = \Sigma \zeta_{mp} \cdot (W_i^2 \cdot \rho \cdot l_i) / (2 \cdot D_i) + \Sigma \zeta_m \cdot (W_i^2 \cdot \rho / 2), \text{ Па}, \quad (1)$$

где ζ_{mp} , ζ_m – соответственно коэффициенты трения и местных сопротивлений;

l_i , D_i – длина и приведенный диаметр участка потока, м ;

$D_i = 4 \cdot S_i / P_i$; S_i – площадь поперечного сечения потока на данном участке, м²; P_i – длина смоченного периметра сечения потока, м;

W_i – скорость потока на данном участке, м/с;

ρ – плотность расплава, кг/м³.

Баланс энергии составляется отдельно для потока в ЭМП и в проковше. В ЭМП выход энергии положительный, ЭМП поддерживает поток. Вместе с тем в ЭМП тоже имеются гидравлические потери, которые уменьшают КПД электромагнитного утяжеления g_e . В проковше есть только гидравлические потери энергии. Численное значение коэффициентов для расчета потерь на трение и на местных сопротивлениях выбирается по эм-

пирическим справочным данным [8]. Величина коэффициентов потерь зависит и от гидродинамического режима потока, характеризующегося числом Re . Коэффициенты выбираются по графикам и таблицам [8]. Исключение составляет коэффициент расхода расплава φ через нижний переливной канал ЭМП. Этот коэффициент формирует скорость W_1 . В свою очередь, импульс от W_1 компенсирует все гидравлические потери энергии кругового потока в промковше. Так что коэффициент φ через скорость W_1 влияет на величину всех скоростей W_i в промковше, а для самого φ табличного значения нет, потому что неизвестно, какая доля g_e расходуется на турбулизацию расплава в ЭМП, а какая на создание W_1 . Поэтому φ надо определять эмпирически из баланса энергии.

Поскольку промковш с ЭМП в настоящее время в эксплуатации пока еще не существует, величину φ определяли на лабораторной физической модели. Адекватной схемой модели является рисунок 1. Кроме рабочего пространства, модель содержит электромагнит, источники постоянного тока и устройства электрокоммутиации. Конструктивной характеристикой тандема ЭМП-промковш является число $m = F/f$ – отношение площадей в плане ванны промковша и ванны ЭМП. Через m определяется разность уровней расплава в промковше и ЭМП, т.е. величины H_1 и H_2 . В спокойной ванне металл занимает положение, обозначенное на рисунке 1 линией к-1 и уровнем налива H . При работе ЭМП уровень металла в нем опускается до H_1 , а в промковше повышается до H_2 на величину h . По правилу сохранения объема несжимаемой жидкости

$$H_2 = H + h; H_1 = H - m \cdot h, \text{ м}, \quad (2)$$

где H – уровень налива в промковше, необходимый по условиям технологии.

Так, для упомянутой двухручьевого МНЛЗ размеры зеркала металла промковша в плане составляют $a_{нк} \cdot b_{нк} = 7000 \cdot 1200$ мм, глубина ванны $l_{нк} = 800$ мм. Размер зеркала металла в ЭМП был бы

$a_{эмп} \cdot b_{эмп} = 500 \cdot 200$ мм, и число m составит при таких условиях $(7 \cdot 1,2)/(0,5 \cdot 0,2) = 84$. Если под действием ЭМ утяжеления уровень металла в ЭМП понизится на 84 мм, что хорошо заметно, то в промковше повышение уровня будет около 1 мм, что пренебрежимо мало по сравнению с глубиной ванны промковша и на скорость разлива не повлияет.

На физических моделях изучали скорости движения сплава Вуда и водных растворов электролитов. Модель для сплава Вуда имела $m = 3$, для водных растворов $m = 12$. Технические возможности физической модели по электросиловому воздействию на модельную жидкость: индукция магнитного поля B не более 0,2 Тл, ток I , подаваемый в ванну ЭМП, не более 40 А. Потoki в ванне со сплавом Вуда различимы по движению окисных пленок на поверхности металла, по глубине потоки не визуализируются. Потoki водных растворов визуализируются подкрашиванием и киносъемкой.

Рассмотрим баланс энергии в ванне ЭМП модели со сплавом Вуда (рис. 1). Приход энергии составляет

$$\Delta P_{прих} = \Delta P_1 + \Delta P_2, \text{ Па},$$

где ΔP_1 – энергия, сообщаемая жидкости в ЭМП силовым воздействием ЭМ поля $B \cdot I$;

ΔP_2 – энергия вносимая возвратным потоком при циркуляции жидкости.

Эта энергия сосредоточена в ванне ЭМП в виде потенциальной и кинетической составляющих: $E = E_{ном} + E_{кин}$. $E_{ном}$ формирует статическое давление $\Delta P = \rho \cdot g_e \cdot H_1$, которое поддерживает круговой поток. $E_{кин}$ сосредоточена в вихрях и на скорость W_1 влияет негативно. Насколько негативно, должен показать баланс энергии путем учета всех гидравлических потерь кругового потока. Физическая модель, для которой составляется баланс энергии, имеет следующие размеры жидких ванн: активная зона 1 (АЗ, имитирует ЭМП) – длина $a_{аз} = 0,05$ м, ширина $b_{аз} = 0,0175$ м, глубина $l_{аз} = 0,019$ м; миксерная зона 2 (МЗ, имитирует пром-

ковш, рис. 1) – соответственно $a_{мз} = 0,05$ м; $b_{мз} = 0,05$ м; $l_{мз} = 0,03$ м.

Определим g_e , ΔP_1 , и W_1 при ЭМП в модели (для плотности сплава Вуда – 9500 кг/м³ и величины $H_1 = 0,018$ м, т.е. на 1 мм ниже уровня спокойной ванны)

$$g_e = B \cdot I / (b_{аз} \cdot l_{аз} \cdot \rho = \frac{B \cdot I}{0,175 \cdot 0,019 \cdot 9500} = 0,316 \cdot B \cdot I, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \rho \cdot g_e \cdot H_1 = \\ &= 9500 \cdot 0,018 \cdot 0,316 \cdot B \cdot I = \\ &= 54,04 \cdot B \cdot I, \text{ Па}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} W_1 &= \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g_e \cdot H_1} = \\ &= \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot 0,316 \cdot B \cdot I \cdot 0,018} = \\ &= 0,1066 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I}, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (5)$$

Остальные скорости в модели выражаются через φ , B , I , а также скорость W_1 в соответствии с законом неразрывности потока. Из АЗ ЭМП поток со скоростью W_1 поступает в МЗ (рис. 1). Считаем, что прямой (нижний) и обратный (верхний) потоки в промковше имеют одинаковые площади сечения. Поток из АЗ вытекает в МЗ через щель (рис. 1) сечение $S_1 = l_{щ} \cdot b_{щ} = 0,004 \cdot 0,016 = 0,000064$, м² и образует нижний поток сечением $S_3 = l_{мз} / 2 \cdot b_{мз} = 0,015 \cdot 0,050 = 0,00075$, м². Отношение $S_1 / S_3 = 0,000064 / 0,00075 = 0,085$, и коэффициент местного сопротивления выхода (потери на удар) составляет $\zeta_{м,вых.аз} = 0,9$ [8]. Потеря энергии выхода из ЭМП в промковш

$$\begin{aligned} \Delta P_{вых.мз} &= \zeta_{м,вых.аз} \cdot (\rho \cdot W_1^2) / 2 = \\ &= 0,9 \cdot 9500 \cdot (0,1066 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 / 2 = \\ &= 48,58 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па}. \end{aligned} \quad (6)$$

Скорости потоков в промковше, по закону неразрывности, $W_1 \cdot S_1 = W_2 \cdot S_2 = W_x \cdot S_x$.

Скорость течения в промковше

$$\begin{aligned} W_x &= W_1 \cdot S_1 / S_2 = 0,085 \cdot 0,1066 \cdot \varphi \cdot \\ &\cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,009 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I}, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поток W_x в МЗ проходит через повороты на 90° и количество которых составляет 4 и возвращается в АЗ. Коэффициент местного сопротивления на одном повороте составляет $\zeta_{м,пов.мз} = 1,2$ [8], и потеря энергии на поворотах составит

$$\begin{aligned} \Delta P_{пов.мз} &= n \cdot \zeta_{м,пов.мз} \cdot (\rho \cdot W_x^2) / 2 = \\ &= 4 \cdot 1,2 \cdot 9500 \cdot (0,009 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 / 2 = \\ &= 1,847 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее происходит сужение потока при обратном входе в АЗ. Площадь сечения потока входа при ширине $a_{вх} = 0,0175$ м и глубине $l_{вх} = 0,010$ м, (рис. 1) $S_2 = 0,0175 \cdot 0,01 = 0,000175$, м², площадь возвратного потока $S_{возвр1} = 0,05 \cdot 0,015 = 0,00075$, м², отношение площадей 0,233, и коэффициент сопротивления составляет $\zeta_{м,суж.мз} = 0,42$ [8]. Скорость

$$\begin{aligned} W_2 &= W_1 \cdot S_1 / S_2 = \\ &= 0,1066 \cdot 0,00064 / 0,000175 = \\ &= 0,039 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I}, \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (9)$$

Потеря энергии при возврате потока в АЗ

$$\begin{aligned} \Delta P_{воз.мз} &= \zeta_{м,суж.мз} \cdot (\rho \cdot W_2^2) / 2 = \\ &= 0,42 \cdot 9500 \cdot (0,039 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 / 2 = \\ &= 3,034 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па}. \end{aligned} \quad (10)$$

Потери энергии на трение при течении сплава Вуда в МЗ для малых значений числа Рейнольдса, который в используемой модели равен ≈ 200 и коэффициенте трения $\zeta_{тр.мз} = 0,4$ [8], определим для следующих размеров потока: длина $2 \cdot a_{мз} = 0,1$ м,

$$\begin{aligned} S_4 &= l_{мз} / 2 \cdot b_{мз} = 0,015 \cdot 0,05 = 0,00075, \text{ м}^2 \\ \text{приведенный диаметр } D_4 &= 4 \cdot S_4 / \Pi_4 = \\ &= 4 \cdot 0,00075 / (2 \cdot 0,015 + 2 \cdot 0,05) = 0,023, \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{тр.мз} &= \zeta_{тр.мз} \cdot \left(\frac{\rho \cdot W_x^2}{2}\right) \cdot 2 \cdot \frac{a_{мз}}{D_1} = \\ &= 0,4 \cdot 9500 \cdot \frac{(0,009 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2}{2} \cdot \frac{0,1}{0,023} = \\ &= 0,67 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (11)$$

Возвратный поток со скоростью W_2 вносит в АЗ энергию ΔP_2

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \rho \cdot W_2^2 / 2 = 4 \cdot 1,2 \cdot 9500 \cdot \\ &= (0,039 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 / 2 = \\ &= 7,22 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (12)$$

Всего приход энергии в АЗ составляет

$$\begin{aligned} \Delta P_{прих} &= \Delta P_1 + \Delta P_2, \text{ Па,} \\ &= (54,04 + 7,22 \cdot \varphi^2) \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (13)$$

Подсчитываем потери энергии в АЗ ЭМП.

При входе потока из МЗ в АЗ имеются потери на удар, т.к. поток сливается с нисходящим в АЗ потоком, поперечным сечением $S_5 = 0,0175 \cdot 0,05 = 0,000875, \text{ м}^2$. Соотношение сечений $S_2 / S_5 = 0,2$, коэффициент местного сопротивления $\zeta_{м,вх.мз} = 0,68$ [8] и потери на входе

$$\begin{aligned} \Delta P_{вх.аз} &= \zeta_{м,вх.аз} \cdot (\rho \cdot W_2^2) / 2 = \\ &= 0,68 \cdot 9500 \cdot (0,039 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 / 2 = \\ &= 4,91 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (14)$$

Потери на трение в нисходящем потоке длиной $l_{аз} = 0,018, \text{ м}$ и $S_5 = 0,000875, \text{ м}^2$, при $\zeta_{тр.аз} = 0,4$ и $S_1 / S_5 = 0,073$

$$\begin{aligned} \Delta P_{тр.аз} &= \zeta_{тр.аз} \cdot \rho \cdot \frac{(W_1 \cdot S_1 / S_2)^2}{2} \cdot \frac{l_{аз}}{D_5} = \\ &= 0,4 \cdot 9500 \cdot (0,1066 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I} \cdot 0,0731)^2 / 2 \cdot \\ &\cdot 0,018 / 0,026 = 0,08 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (15)$$

Потери на 2 поворота на 90° потока в АЗ

$$\begin{aligned} \Delta P_{нов.аз} &= n \cdot \zeta_{м.нов.аз} \cdot \rho \cdot \frac{(W_1 \cdot S_1)^2}{2 S_5} = \\ &= 2 \cdot 1,2 \cdot 9500 \cdot \frac{(0,1066 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I} \cdot 0,0731)^2}{2} = \\ &= 0,69 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (16)$$

Потери на сужение нисходящего потока перед его выходом в МЗ, при коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{м,суж.аз} = 0,47$

$$\begin{aligned} \Delta P_{суж.аз} &= \zeta_{м,суж.аз} \cdot \rho \cdot W_1^2 / 2 = \\ &= 0,47 \cdot 4750 \cdot (0,1066 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I})^2 = \\ &= 25,37 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па.} \end{aligned} \quad (17)$$

Всего потерь энергии в АЗ

$$\Delta P_{аз} = \Delta P_{вх} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{нов} + \Delta P_{суж} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{аз} &= (4,91 + 0,08 + 0,69 + 25,37) \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I = \\ &= 30,05 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па} \end{aligned}$$

Всего потерь энергии в МЗ

$$\Delta P_{мз} = \Delta P_{вых} + \Delta P_{тр} + \Delta P_{нов} + \Delta P_{воз} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{мз} &= (48,58 + 1,847 + 3,034 + 0,67) \cdot \\ &\cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I = 54,131 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I, \text{ Па} \end{aligned}$$

Общий баланс энергии в проковше с ЭМП в физической модели со сплавом Вуда

$$\Delta P_{прих} = \Delta P_{расх},$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = \Delta P_{аз} + \Delta P_{мз},$$

$$(54,04 + 7,22 \cdot \varphi^2) = (30,05 + 54,131) \cdot \varphi^2,$$

тогда $\varphi^2 = 54,04 / 76,96 = 0,702$, а $\varphi = 0,84$.

Получаем вероятные значения скоростей течения металла в модели ЭМП-проковш

$$W_1 = 0,1066 \cdot 0,84 \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,089 \cdot \sqrt{B \cdot I},$$

$$W_2 = 0,039 \cdot 0,84 \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,032 \cdot \sqrt{B \cdot I},$$

$$W_x = 0,009 \cdot 0,84 \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,0076 \cdot \sqrt{B \cdot I}.$$

При разработке реальных перемешивателей результаты модельных исследований следует рассматривать как ориентировочные ввиду малых размеров модели и соответственно чисел Re , влияющих на гидравлические сопротивления.

Как пример приложения изложенной методики гидравлического расчета к реальным объектам рассмотрим промковш слябовой МНЛЗ ПАО «АМК», если его оборудовать ЭМП, и какая для этого потребуется установленная мощность источников электропитания. Исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице 1. Для выбранных в таблице 1 параметров конструктивная характеристика связки ЭМП-промковш: $m = (7 \cdot 1,2) / (0,5 \cdot 0,2) = 84$.

Без перемешивателя усредненная скорость течения стали к стаканам-дозаторам составляет $\approx 0,005$ м/с. Чтобы эта скорость не препятствовала создаваемым течениям в круговом потоке (рис. 1), скорость последних должна быть на порядок больше, например 0,050-0,100 м/с. Эта скорость легко регулируется изменением электрической мощности, подаваемой на ЭМП.

Площадь поперечного сечения жидкости в ванне ПК согласно таблицы 1 составляет $S_{\text{жид.ПК}} = 0,8 \cdot 1,2 = 0,96 \text{ м}^2$, а какую ее часть S_x занимает нижний, какую верхний поток можно только предполагать. Ясно, что эти потоки существуют и что они разделены. В данном случае принимаем, что те вихри, которыми они разделены, наполовину находятся в нижнем, наполовину в верхнем потоке, и площадь поперечного сечения каждого из них $S_x = 1,2 \cdot 0,8 / 2 = 0,48 \text{ м}^2$. Энергия для их поддержания поступает с импульсом скорости W_1 . По выбранным размерам рассчитывали приход и потери энергии на трение и на местных сопротивлениях представленные в таблице 1.

Для расчетов скорость потока в промковше принимали 0,05 м/с, высоту верхнего переливного канала для возвратного потока из промковша в ЭМП 0,2 м, высоту нижнего переливного канала 0,1 м.

Величину потерь энергии рассчитывали по следующим значениям скоростей пото-

ков, в соответствии с правилом неразрывности

$$W_1 = 0,0408 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I},$$

$$W_2 = W_1 / 2 = 0,0204 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I},$$

т.к. $S_{\text{верх}}$ в 2 раза больше чем S_1 .

$$\begin{aligned} W_x &= W_1 \cdot S_1 / S_x = \\ &= 0,0408 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I} \cdot 0,1 \cdot 0,2 / (1,2 \cdot 0,8 / 2) = \\ &= 0,0017 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,05 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Потери энергии на трение в промковше определяем для коэффициента потерь на трение $\zeta_{\text{тр.мз}} = 0,05$ с учетом того, что критерий Рейнольдса в этих условиях имеет значения порядка 10^4 . При использовании ЭМП существуют 2 потока (верхний и нижний) примерно одинаковых по сечению. Длина общего потока равна $2 \cdot a_{\text{нк}} = 14 \text{ м}$, а приведенный диаметр в рассматриваемом сечении

$$D_i = (4 \cdot b_{\text{нк}} \cdot l_{\text{ПК}} / 2) / (2 \cdot b_{\text{нк}} + 2 \cdot l_{\text{ПК}} / 2),$$

$$D_i = (4 \cdot 1,2 \cdot 0,8 / 2) / (2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,8 / 2) = 0,6 \text{ м}.$$

Баланс энергии кругового потока в промковше с ЭМП составит

$$5 \cdot B \cdot I + 1,561 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I =$$

$$= 6,407 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I + 8,796 \cdot \varphi^2 \cdot B \cdot I,$$

$$13,642 \cdot \varphi^2 = 5, \varphi^2 = 0,367, \varphi = 0,605.$$

По выбранной выше желаемой скорости течения стали в ванне промковша 0,05 м/с находим величину магнитной индукции B и силы тока I , которые обеспечивают заданный круговой поток в связке ЭМП-промковш

$$= 0,0017 \cdot \varphi \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,05 \text{ м/с},$$

$$= 0,0017 \cdot 0,605 \cdot \sqrt{B \cdot I} = 0,05 \text{ м/с},$$

$$\sqrt{B \cdot I} = 48,614, B \cdot I = 2363 \text{ ТлА}.$$

МЕТАЛЛУРГИЯ

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета ЭМП для промежуточного ковша слябовой МНЛЗ ПАО «АМК»

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Исходные данные			
Промковш (МЗ)			
Емкость	Q	т	60
Длина	$a_{пк}$	м	7
Ширина	$b_{пк}$	м	1,2
Глубина	$l_{пк}$	м	0,8
Скорость потока к стаканам-дозаторам	$V_{пот.доз}$	м/с	0,005
Площадь поперечного сечения	$S_{жид.пк}$	м ²	0,96
Коэффициенты местного сопротивления и трения в промковше при:			
входе потока в промковш	$\zeta_{м, вх.мз}$		0,9
повороте потока	$\zeta_{м, пов.мз}$		1
сужении канала	$\zeta_{м, суж.мз}$		0,47
течении потока в промковше	$\zeta_{тр.мз}$		0,05
Электромагнитный перемешиватель (АЗ)			
Длина	$a_{эмп}$	м	0,5
Ширина	$b_{эмп}$	м	0,2
Глубина	$l_{эмп}$	м	0,8
Скорость потоков создаваемых ЭМП	$V_{пот.эмп}$	м/с	0,05
Площадь поперечного сечения	S_2	м ²	0,16
Высота канала: верхнего	$l_{верх}$	м	0,2
нижнего	$l_{ниж}$	м	0,1
Площадь канала: верхнего	$S_{верх}$	м ²	0,04
нижнего	S_1	м ²	0,02
Коэффициенты местного сопротивления и трения в ЭМП при:			
входе потока в ЭМП	$\zeta_{м, вх.аз}$		0,85
повороте потока	$\zeta_{м, пов.аз}$		1,2
сужении канала	$\zeta_{м, суж.аз}$		0,5
течении потока в ЭМП	$\zeta_{тр.аз}$		0,05
Плотность стали	$\rho_{ст}$	кг/м ³	7500
Площадь поперечного сечения вихрей	$S_x = S_{жид.пк}/2$	м ²	0,48
Результаты расчета			
Электромагнитное утяжеление	g_e	м/с ²	1,96
Скорость потока из АЗ в МЗ	W_1	м/с	
Электромагнитное давление	ΔP_1	Па	11815
Энергия возвратного потока из МЗ в АЗ	ΔP_2	Па	1350
Приход энергии в АЗ	ΔP	Па	13165
Потери энергии в промковше при:			
выходе потока из АЗ в МЗ	$\Delta P_{вых.аз}$	Па	4859
поворотах	$\Delta P_{пов.мз}$	Па	37
сужении потока на входе из МЗ в АЗ	$\Delta P_{суж.мз}$	Па	634
трении	$\Delta P_{тр.мз}$	Па	11
Всего потерь энергии потоком в МЗ	$\Delta P_{мз}$	Па	5541
Потери энергии в ЭМП при:			
входе потока из МЗ в АЗ	$\Delta P_{вх.мз}$	Па	1148
поворотах	$\Delta P_{пов.аз}$	Па	3239
сужении потока на выходе из АЗ в МЗ	$\Delta P_{суж.аз}$	Па	2699
трении	$\Delta P_{тр.аз}$	Па	522
Всего потерь энергии потоком в АЗ	$\Delta P_{аз}$	Па	7608
Коэффициент расхода	ϕ		0,605
Произведение магнитной индукции и силы тока	$B \cdot I$	ТлА	2363

По найденным таким способом параметрам производится выбор источников электропитания для электромагнита и ванны перемешивателя. Для обеспечения габаритов ЭМП соизмеримых с геометрическими размерами эксплуатируемых в настоящее время проковшей и учитывая имеющийся опыт создания электромагнитных перемешивателей для получения жидких комплексных лигатур величина магнитной индукции в зазоре электромагнита шириной 0,4 м должна быть 0,4-0,6 Тл. При индукции магнитного поля $B = 0,5 \text{ Тл}$ необходимая для реализации электромагнитного перемешивания стали в проковше ПАО «АМК» сила тока составит около 4,7 кА. Для электропитания магнита и дугового электроподвода на ванну требуется два отдельно регулируемых аппарата.

Питание магнита можно осуществлять с использованием источника постоянного тока, обеспечивающего напряжение порядка 20-25 В и силу тока 10-13 кА ($\approx 200-325 \text{ кВт}$). Такие параметры имеет, например ВАК 12500/24В. Питание ванны с одновременным дуговым нагревом требует источника постоянного тока с напряжением до 75 В и силой

тока 6 кА ($\approx 450 \text{ кВт}$), что может обеспечить ВАК 6300/75В. Кроме источников питания для изготовления обмоток электромагнита необходимо около 3 т меди.

Примерные эксплуатационные затраты на электроэнергию при использовании ЭМП стали в проковше МНЛЗ составят 1,7 кВт·ч/т или около 1,3-1,5 грн/т.

Таким образом, в результате проведенного физического моделирования и гидравлического расчета промежуточного ковша с электромагнитным перемешиванием жидкой стали определены основные электрические параметры обработки, являющиеся исходными данными для выбора необходимых источников питания и проектирования промышленных установок для рафинирования жидкой стали от неметаллических включений в процессе непрерывной разливки.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение гидравлических и электрических параметров проковша с ЭМП имеющим различные конструктивные элементы способствующие интенсификации удаления неметаллических включений.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н. Современный прогресс и перспективы развития процессов непрерывной разливки / А.Н. Смирнов // *Сталь*. – 2005. – №12. – С. 29-32.
2. Ефимов В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов // – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
3. Mechanism of fluid flow in continuous casting tundish with different turbostop-pers. Odental H.J., Boling R., Pfeifer H. et e. // *Steel Research*. – 2001. – 72. Ns 1H-12. – P. 466-476.
4. Ефимов Г.В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / Г.В. Ефимов // *Сталь*. – 2001. – №4. – С. 24-27.
5. Либерман А.Л. Фильтрация стали в процессе непрерывной разливки / А.Л. Либерман, И.В. Дубровин, В.А. Коржавин, В.А. Зубов, Т.Н. Попова, Т.А. Устинов // *Сталь*. – 1992. – №4. – С. 16-18.
6. Смирнов А.Н. Электродуговая и электромагнитная обработка стали: Монография / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, С.Б. Эссельбах, С.В. Семирягин, М.Ю. Проценко, В.С. Эссельбах. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 320 с.
7. Патент на корисну модель. Україна. № 71324. МПК В22D 11/10. Проміжний ківш машини безперервного (напівбезперервного) лиття заготовок / І.О.М. Смірнов, С.Б. Ессельбах, С.В. Куберський, М.Ю. Прценко, І.В. Шутюв, В.С. Ухін, В.А. Головатий // Заявник і власник Донбас. державн. техн. ун-т. – (№ и 2011 15435), заявл. 27.12.2011, опубл. 10.07.12. Бюл. № 13, – 4с.
8. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боршанский. – Госэнергоиздат, М – Л. – 1959. – 414 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

Стаття поступила в редакцію 01.07.13.

к.т.н. Куберський С.В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна, Skuberskiy@yandex.ru)

ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОМІЖНОГО КОВША МБЛЗ, ОБЛАДНАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПЕРЕМІШУВАЧЕМ

З використанням результатів фізичного моделювання виконано розрахунок основних гідравлічних і електричних параметрів проміжного ковша МБЛЗ з електромагнітним перемішуванням металу для рафінування його від неметалічних включень.

Ключові слова: *проміжний ківш, електромагнітне перемішування, потік, тиск, швидкість, енергія, баланс, коефіцієнт витрати, магнітна індукція, сила струму.*

Kuberskiy S.V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine, Skuberskiy@yandex.ru)

HYDRAULIC CALCULATION OF THE TUNDISH CONTINUOUS CASTING MACHINE WITH ELECTROMAGNETIC STIRRER

Using the results of physical modeling calculated the basic hydraulic and electrical parameters of the tundish with electromagnetic stirring metal refining it from the non-metallic inclusions.

Key words: *tundish, electromagnetic stirring, flow, pressure, speed, energy, balance, flow coefficient, magnetic induction, amperage.*