

Куберский С. В.

Донбасский государственный технический университет

E-mail: Skuberskiy@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ

Приведены результаты физического моделирования и расчетов параметров электромагнитного перемешивания (ЭМП) стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок. Предложена методика пересчета величин, полученных с использованием физических моделей, на промышленный промежуточный ковш объемом 0,5 м³. Определены режимы ЭМП, рекомендованы необходимое оборудование и технология обработки стали в условиях действующего производства с целью её гомогенизации и рафинирования от неметаллических включений.

Ключевые слова: *непрерывная разливка, сталь, качество, моделирование, электромагнитное перемешивание, усреднение, рафинирование, параметры обработки, промышленная установка.*

Современные металлургические микроразводы (ММКЗ) — это гибкие производства, выпускающие качественную продукцию с высокой добавленной стоимостью для региональных рынков. Одной из специфических особенностей этих предприятий является небольшая единичная мощность плавильных агрегатов, а следовательно, и всего оборудования, используемого в технологической схеме производства металлопродукции, что создает определенные проблемы при внепечной обработке и непрерывной разливке стали. Небольшие объемы металла быстро остывают в сталеразливочном (СК) и промежуточном (ПК) ковшах, что сокращает допустимое время на его обработку, повышает риск переохлаждения струи в кристаллизаторе, приводит к нестабильности процесса и снижению качества. Кроме того, в условиях невысокой стойкости футеровки промковша и его малого объема возникает значительная температурная и концентрационная неоднородность расплава, а попадание из СК в ПК даже небольшого количества шлака приводит к резкому увеличению концентрации неметаллических включений (НВ) и существенно ухудшает качество металла. Поэтому без применения специальных методов обеспечить высокую чистоту, равномерность состава и температуры металла, подаваемого в кристаллизатор, достаточно сложно.

Эффективное решение этих проблем может обеспечить электромагнитное перемешивание (ЭМП) в ПК, позволяющее интенсифицировать процессы усреднения температуры и состава, улучшить условия рафинирования и модифицирования стали, что обеспечит стабильный процесс непрерывной разливки, повышение энергоэффективности и экологичности производства [1–7].

При таком способе воздействия образуется бегущее или вращающееся магнитное поле, обеспечивающее контролируемое движение жидкого металла, что позволяет гомогенизировать температуру и химический состав расплава, а также устранить застойные зоны или уменьшить их объем. Кроме того, ЭМП обеспечивает следующие преимущества:

- снижение теплотерь в сравнении с продувкой инертными газами, что особенно критично для ММКЗ с их малыми объемами металла и высокими удельными потерями тепла;
- интенсификацию реакций и процессов при обработке шлаками или продувке газами;
- улучшение условий всплывания НВ, что повышает чистоту стали;
- стабилизацию процесса непрерывной разливки за счет поддержания однородной температуры и состава металла;

МЕТАЛЛУРГИЯ

– снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций и дефектов поверхности непрерывнолитого металла.

В настоящее время применение ЭМП стали в ПК в условиях металлургических предприятий носит ограниченный характер, поэтому основная цель данного исследования заключалась в развитии теоретических представлений об этом процессе, а также разработке технологических рекомендаций для реализации результатов исследований в промышленных условиях.

Для достижения поставленной цели в работе с использованием физического моделирования и расчетной методики определения гидродинамических параметров жидкой металлической ванны в условиях электромагнитных воздействий [8] решались следующие задачи:

– определить влияние силового электромагнитного воздействия (СЭМВ), определяемого как произведение магнитной индукции (В) и силы тока (I), на скорость потоков, создаваемых в ванне электролита или металлического расплава;

– предложить методику пересчета параметров СЭМВ, полученного в разных моделях, на промышленный ПК;

– разработать технологические рекомендации для реализации полученных результатов в промышленных условиях.

Экспериментальные исследования параметров ЭМП были выполнены с использованием двух физических моделей ПК (№ 2 и № 3), состоящего из активной (АЗ) и миксерной (МЗ) зон, соединенных между собой нижним и верхним переливными каналами. Физические модели имели близкое конструктивное исполнение, но отличались габаритами и геометрическими размерами отдельных технологических узлов, а следовательно, и массой жидкости, подвергаемой СЭМВ (табл. 1). В качестве модельных жидкостей в модели № 2 использовали 10%-ный раствор NaCl и жидкий сплав Вуда, а в модели № 3 — только солевой раствор, что было связано с недостаточным количеством сплава Вуда для проведения исследований.

Таблица 1

Основные геометрические размеры использованных в исследованиях ПК МНЛЗ с ЭМП (м)

Параметр	ПК — 0,5 м ³	Модель № 2	Модель № 3
Длина зоны:			
активной (А)	0,600	0,065	0,140
миксерной (М)	0,930	0,175	0,700
Ширина зоны:			
А	0,210	0,030	0,060
М	0,600	0,030	0,120
Высота зоны:			
А	1,000	0,120	0,160
М	1,000	0,120	0,160
Уровень спокойной ванны:			
А	0,800	0,060	0,080
М	0,800	0,060	0,080
Нижний переливной канал:			
ширина	0,115	0,0160	0,060
высота	0,065	0,004	0,004
Верхний переливной канал:			
ширина	0,115	0,016	0,060
высота	0,130	0,008	0,008
Площадь:			
А	0,126	0,00195	0,0084
М	0,558	0,00525	0,084
Отношение площадей М/А	4,43	2,69	10

Качественная оценка расчетных и экспериментальных значений изменения уровня электролита (расплава) в миксерной зоне ($\Delta h_{мз}$), полученных в моделях № 2 и № 3, в зависимости от СЭМВ показывает, что они имеют схожий характер и увеличиваются по мере его роста. Кроме того, во всех случаях расчетное СЭМВ, необходимое для изменения $\Delta h_{мз}$ на определенное значение, было меньше полученного в ходе экспериментов, что связано с проводимостью солевого раствора и расплава Вуда. Аналогичное влияние СЭМВ отмечено и при исследовании скоростей потоков на выходе из АЗ и в МЗ.

Для количественного анализа необходимо учитывать тот факт, что эксперименты с электролитом и расплавом Вуда проводились в разных моделях (№ 2 и № 3). Поэтому для корректного сравнения полученных результатов требуются определенные подходы, которые позволят прогнозировать параметры электромагнитной обработки в различных металлургических емкостях, на основании результатов физического моделирования.

Согласно расчетам по предложенной методике, основное влияние на скорость потоков оказывает СЭМВ, которое при использовании в качестве модельной жидкости 10%-ного раствора NaCl для физических моделей № 2, № 3 и ПК для разлива стали (объемом 0,55 м³) составило 0,177, 0,711 и 6,271 Тл·А соответственно.

В соответствии с формулой (1) поток жидкого металла электромагнитным давлением выжимается из нижней части АЗ в МЗ ПК со скоростью

$$W_1 = \phi \cdot \sqrt{2 \cdot g_e \cdot H_1}, \quad (1)$$

где ϕ — коэффициент расхода; g_e — электромагнитное ускорение, м/с²; H_1 — уровень раствора (расплава) в АЗ при ЭМП, м.

Электромагнитное ускорение определяется по формуле (2):

$$g_e = B \cdot I / (b_{аз} \cdot l_{аз} \cdot \rho), \text{ м / с}^2, \quad (2)$$

где B — индукция магнитного поля, Тл; I — сила тока, А; $l_{аз}$ — уровень спокойной ванны в АЗ, м; $b_{аз}$ — ширина АЗ, м; ρ — плотность раствора (расплава) кг/м³.

Формулы (1) и (2) свидетельствуют о том, что СЭМВ зависит от:

- заданной скорости потоков на выходе из АЗ (W_1) и в МЗ (W_x) (расчетная W_1 , м/с: № 2 — 0,084–0,492; № 3 — 0,12–0,7; ПК — 0,193–1,124);

- массы обрабатываемого раствора (расплава) (для солевого раствора m , кг: № 2 — 0,4627; № 3 — 7,9168; ПК — 586,051);

- площади проводника, перпендикулярной направлению тока ($S_{пр} = b_{аз} \cdot l_{аз}$, м²: № 2 — 0,0018; № 3 — 0,0048; ПК — 0,168);

- уровня раствора (расплава) в АЗ после наложения воздействия (расчетное для солевого раствора H_1 , м: № 2 — 0,0572–0,04385; № 3 — 0,0766–0,06; ПК — 0,7885–0,7333);

- гидравлических коэффициентов (местного сопротивления и трения при движении потока в ПК, сужении перед входом в нижний и верхний переливные каналы, расширении при выходе в МЗ и возврате в АЗ, а также поворотах, что учитывает разность в размерах образующихся потоков и сечений переливных каналов);

- коэффициента расхода ϕ (расчетное: № 2 0,823; № 3 0,825; ПК 0,821).

Используя формулы (1) и (2), получим

$$\frac{(B \cdot I)_{№3}}{(B \cdot I)_{№2}} = \frac{(W_1^{№3})^2 \cdot S_{пр}^{№3} \cdot \phi_{№2}^2 \cdot H_1^{№2}}{(W_1^{№2})^2 \cdot S_{пр}^{№2} \cdot \phi_{№3}^2 \cdot H_1^{№3}} \cdot (3)$$

Данное соотношение позволяет переписать параметры, полученные в одной модели на произвольный ПК при известных значениях входящих в него величин.

Для моделей № 2 и № 3 это значение составит

$$\frac{0,711}{0,177} = \frac{0,12^2 \cdot 0,0048 \cdot 0,823^2 \cdot 0,05723}{0,0844^2 \cdot 0,0018 \cdot 0,825^2 \cdot 0,0766} \cdot 4,017 = 4,044.$$

Полученные значения являются достаточно близкими, что доказывает правиль-

ность выбранного подхода для пересчета параметров между различными моделями.

Расчетные отношения $B \cdot I$, полученные при обработке раствора соли в модели № 3, к аналогичным значениям для модели № 2 и ПК составляют 3,92–4,01 и 28,99–35,57 соответственно. Отношения расчетных значений этого параметра на массу обрабатываемого раствора составляют 0,229–0,235 и 0,023–0,028, так как масса раствора соли в модели № 3 и ПК больше, чем в модели № 2 в 17,11 и 1266,6 раза соответственно. Отношения экспериментальных значений $B \cdot I/m$, полученных при обработке раствора соли в моделях № 3 и № 2, составляют 0,216–0,225, что достаточно близко к полученным расчетным значениям, и для прогнозирования СЭМВ в реальных металлургических емкостях можно использовать соотношение (4)

$$\frac{\left(\frac{B \cdot I}{m}\right)_{p.m}}{\left(\frac{B \cdot I}{m}\right)_{p.po}} = \frac{\left(\frac{B \cdot I}{m}\right)_{э.м}}{\left(\frac{B \cdot I}{m}\right)_{н.ро}}, \quad (4)$$

где $(B \cdot I/m)_{p.m}$ — расчетное значение для модели; $(B \cdot I/m)_{p.po}$ — расчетное значение для реального объекта; $(B \cdot I/m)_{э.м}$ — экспериментальное значение для модели; $(B \cdot I/m)_{н.ро}$ — прогнозируемое значение для реального объекта.

Используя результаты моделирования электромагнитной обработки расплава Вуда в модели № 2 и выражение (4), можно спрогнозировать удельное СЭМВ в реальном ПК (рис. 1).

В результате расчетов получено, что для обеспечения скоростей потоков расплава Вуда в МЗ (W_x) в пределах 0,006–0,035 м/с в ПК вместимостью 5390 кг (3995 кг стали) необходимо создать в АЗ удельное СЭМВ 0,021–0,066 Тл·А/кг (207–650 Тл·А/м³), что обеспечит повышение уровня расплава в МЗ на 0,0026–0,015 м (опускание в АЗ на

0,0115–0,0667 м), W_1 0,193–1,124 м/с и секундный объем прокачиваемого через нижний канал расплава 0,0014–0,0084 м³/с.

На обработку всего расплава требуемое СЭМВ составит 113–356 Тл·А. Тогда при $B=0,5$ Тл: $I=226–712$ А. Учитывая разницу в удельном электросопротивлении и плотности стали и Вуда ($1,4 \cdot 10^{-7}$ и $4,71 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, 7300 и 9500 кг/м³), а также возможные в производственных условиях потери (в зазоре электромагнита, на турбулизацию расплава, трение при движении и др.), для обработки стали можно рекомендовать удельное СЭМВ в пределах 0,02–0,06 Тл·А/кг (20–60 Тл·А/т или 146–438 Тл·А/м³).

С использованием результатов экспериментов по ЭМП и предложенной методики пересчета были определены основные конструктивные и технологические параметры для электромагнитной обработки стали в ПК объемом 0,55 м³ (3995 кг), представленные в таблице 2.

Аналогом ПК с ЭМП может быть реализованная нами в промышленных условиях установка для получения железо-кремнемагниевого лигатура (рис. 2) [9].

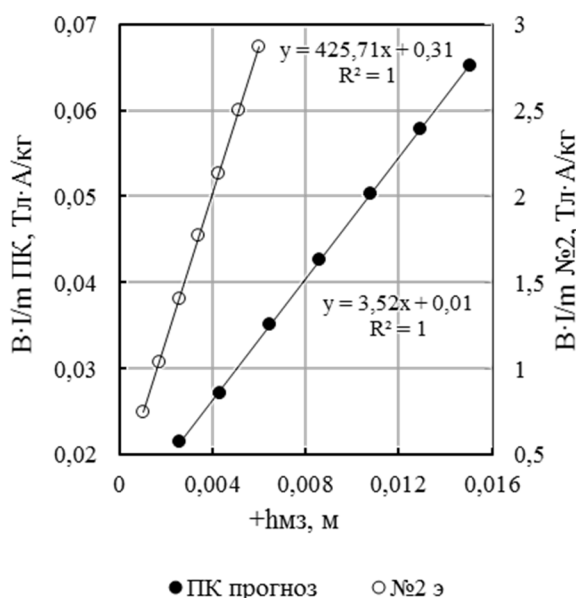


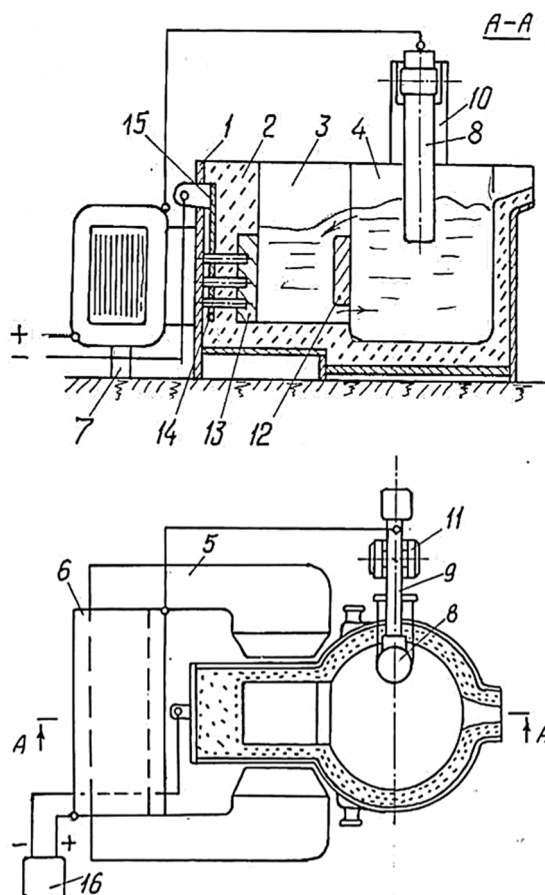
Рисунок 1 — Связь между изменением уровня расплава Вуда в МЗ и СЭМВ для модели № 2 и прогнозные значения в ПК

МЕТАЛЛУРГИЯ

Таблица 2

Технологические параметры ПК объемом 0,5 м³ с ЭМП

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение	
Магнитная индукция	B	Тл	0,5	
Сила тока	I	А	160	480
СЭМВ	B·I	Тл·А	80	240
	B·I/m	Тл·А/кг	0,02	0,06
	B·I/m	Тл·А/т	20	60
	B·I/V	Тл·А/м ³	146	438
Уровень металла при ЭМП: АЗ	H ₁	м	0,7885	0,7331
	МЗ	H ₂	0,8026	0,8151
Скорость потоков	W ₁	м/с	0,193	1,124
	W _x	м/с	0,006	0,035
Объемный расход стали из АЗ в МЗ	Q	м ³ /с	0,0014	0,0084
Время прокатки всей стали через АЗ	τ _{прок}	с	390	65
		мин	6,5	1,1
Кратность циркуляции стали через АЗ	K _ц	разы	1	5



1 — корпус; 2 — футеровка; 3 — активная зона; 4 — миксерная зона; 5 — магнитопровод; 6 — катушки; 7 — опоры; 8 — электрод; 9 — электрододержатель; 10 — стойка; 11 — подшипник; 12 — перегородка; 13 — графитовая плита; 14 — жаропрочные шпильки; 15 — шина; 16 — источник тока

Рисунок 2 — Схема установки для электромагнитной обработки металлических расплавов

Установка позволяет создать электромагнитную обстановку, обеспечивающую организацию направленных управляемых циркуляционных потоков между АЗ 3 и МЗ 4. Корпус 1 установки выполнен сварным из стали марки 45Г17Ю3. Стенка торца АЗ 3 выполнена теплоизолирующей и токопроводящей. Такие несовместимые свойства ей приданы за счет того, что она состоит из графитированной плиты 13 и медной шины 15. Плита и шина электрически соединены жаропрочными шпильками 14, а пространство между шпильками заполнено кварцитом с добавкой борной кислоты. Ток от плиты 13 к шине 15 свободно проходит по шпилькам 14. В резьбах обеспечивается надежный электрический контакт. Передача тепла от плиты 13 к шине 15 затруднена, потому что площадь поперечного сечения всех шпилек составляет 4–5 % от тепловоспринимающей поверхности плиты 13, и тепло уходит фактически только по шпилькам 14.

Электромагнит установки размещался на опорах 7 и имел С-образный магнитопровод 5 с обмотками 6 на тыльной стороне, а на границе АЗ 3 и МЗ 4 размещалась графито-шамотная перегородка 12 с каналами для перетекания расплава.

Ток на перегородку 12 и далее в АЗ 3 подводили через металл МЗ 4 погружаемым графитированным электродом 8 диаметром 200 мм. Электрод 8 прижат к медной головке, приваренной к шинной проводке, смонтированной на поворотной конструкции 9. Прижим резьбовой, подпружиненный, выполнен лентой из стали 10Х18Н9Т толщиной 0,7 мм, шириной 200 мм.

Емкость установки ~0,4 м³: размер АЗ — 0,6×0,6×0,2 м, диаметр МЗ по футеровке — 0,8 м. Источником тока служил выпрямительный агрегат ВАК 12500-24У4 с трансформатором ТСЗПУ-630, 10 кВ.

В ходе последующих исследований было установлено, что расположение обмоток на полюсах как можно ближе к рабо-

чему зазору позволяет увеличить магнитную индукцию в рабочем зазоре в 2–2,5 раза [9, 10]. Такой подход был реализован в промышленной установке емкостью 3 м³.

Работа ПК с ЭМП заключается в следующем:

- АЗ ПК размещается в зазоре электромагнита (рис. 2);

- электрододержатель 9 поворачивают в горизонтальное положение и погружают электрод 8 в расплав;

- пневмозажимами электроды 8 и 13 подключают в цепь рабочего тока установки;

- включают подачу тока от выпрямителя 16 и плавно доводят его величину до заданной. В ПК возникает циркуляция расплава, как показано стрелками (рис. 2). Интенсивность циркуляционных потоков регулируется изменением силы тока на электродах или на электромагните. Для повышения эффективности обработки стали в АЗ может наводиться рафинировочный шлак, а в МЗ производится раскисление-легирование, рафинирование и нагрев стали по методу ДГВ;

- после окончания обработки выключают подачу тока, отключают пневмозажимы ковша и поднимают электрододержатель с электродом из МЗ.

Предложенные параметры и оборудование могут быть использованы при внедрении ЭМП в технологическую цепочку ММКЗ, что представляет собой логичный шаг в направлении повышения их конкурентоспособности. Эта технология напрямую способствует решению актуальных задач ММКЗ: обеспечение стабильно высокого качества продукции при минимизации издержек и повышении общей эффективности производства. Выравнивание температуры и состава стали в ПК, улучшение чистоты металла и стабилизация разлива делают ЭМП не просто опцией, а стратегически важным элементом современного микроразвода.

Список ссылок

1. Смирнов А. Н., Смирнов Е. Н., Верзилов А. П. Физическое моделирование циркуляционных потоков и удаления включений в промежуточном ковше с применением вращающегося электромагнитного поля // *Черные металлы*. 2020. № 7. С. 14–19. EDN BZDPFP
2. Ефимова В. Г. Анализ рафинирования стали в промежуточном ковше // *Сталь*. 2020. № 6. С. 17–20. EDN KJQZSH
3. Дубоделов В. И., Смирнов А. Н., Колесниченко А. Ф. Электромагнитные воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл при непрерывной разливке стали: перспективы использования мирового опыта и отечественных разработок // *Современные тенденции развития металлургических и литейных технологий: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Грозный : ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. ак. М. Д. Миллионщикова», 2019. С. 14–24. EDN IHVBRW*
4. Самойлович Ю. А. Развитие теории рафинирования металла в промежуточном ковше с позиций гидромеханики // *Металлург*. 2009. № 10. С. 45–51. EDN KWJELN
5. *Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting / M. Mabuchi, Yu. Yoshii, T. Nozaki [et al.] // Kawasaki Steel Giho. 1985. Vol. 14. № 4. P. 365–371.*
6. *Applied MHD in the Process of Continuous Casting / E. Takeuchi, M. Zeze, T. Toh, Sh. Mizoguchi // Magneto hydrodynamics in Process Metallurgy : Proceedings of Symposium, San Diego, California, USA, March 1–5. 1992. P. 189–202.*
7. Усовершенствование технологии непрерывной разливки стали за счет применения оригинального магнитодинамического оборудования / В. И. Дубоделов [и др.] // *Процессы литья*. 2006. № 1. С. 7–15.
8. Куберский С. В. Гидравлический расчет промежуточного ковша МНЛЗ, оборудованного электромагнитным перемешивателем // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. 2013. Вып. 40. С. 87–95.
9. *Электромагнитная обработка расплавов : монография / С. Б. Эссельбах [и др.]. Алчевск : ДонГТУ, 2007. 138 с.*
10. Эссельбах В. С., Эссельбах С. Б., Куберский С. В. Математическая модель расчета электромагнитов, используемых при обработке высокотемпературных расплавов // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. 2008. Вып. 26. С. 205–210.

© Куберский С. В., 2025

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
начальником патентного отдела ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 03.10.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Kuberskii S. V. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)
**USING PHYSICAL MODELING TO DETERMINE THE PARAMETERS OF
ELECTROMAGNETIC STIRRING OF STEEL IN THE INTERMEDIATE LADLE**

The results of physical modeling and calculations of the parameters of electromagnetic stirring (EMS) of steel in the intermediate ladle of the continuous casting machine are presented. A method for recalculating values, obtained using physical models to the industrial intermediate ladle with a volume of 0,5 m³ has been proposed. The EMS modes have been defined, and the necessary equipment and steel

processing technology have been recommended to homogenize and refine it from non-metallic inclusions in the ongoing production.

Key words: continuous casting, steel, quality, modeling, electromagnetic stirring, averaging, finishing, processing parameters, industrial installation.

References

1. Smirnov A. N., Smirnov E. N., Verzilov A. P. Physical modelling of circulation flows and removal of inclusions in the intermediate ladle using a rotating electromagnetic field [Fizicheskoe modelirovanie cirkulyacionnyh potokov i udaleniya vklyucheniij v promezhutochnom kovshe s primeneniem vrashchayushchegosya elektromagnitnogo polya]. *Chernye Metally*. 2020. No. 7. Pp. 14–19. EDN BZDPFP
2. Efimova V. G. Analysis of steel refining in the intermediate ladle [Analiz rafinirovaniya stali v promezhutochnom kovshe]. *Stal'*. 2020. No. 6. Pp. 17–20. EDN KJQZSH
3. Dubodelov V. I., Smirnov A. N., Kolesnichenko A. F. Electromagnetic effects on liquid and crystallizing metal at continuous steel casting: prospects for using the global expertise and domestic developments [Elektromagnitnye vozdeystviya na zhidkij i kristallizuyushchijsya metall pri nepreryvnoj razlivke stali: perspektivy ispol'zovaniya mirovogo opyta i otechestvennyh razrabotok]. *Sovremennye tendencii razvitiya metallurgicheskikh i litejnyh tekhnologij: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. 2019. Pp. 14–24. EDN IHBMRW
4. Samoilovich Yu. A. Developing the theory of metal refining in an intermediate ladle from the standpoint of hydromechanics [Razvitie teorii rafinirovaniya metalla v promezhutochnom kovshe s pozicij gidromekhaniki]. *Metallurg*. 2009. No. 10. Pp. 45–51. EDN KWJELN
5. Mabuchi M., Yoshii Yu., Nozaki T. [et al.]. Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting. *Kawasaki Steel Giho*. 1985. Vol. 14. No. 4. Pp. 365–371.
6. Takeuchi E., Zeze M., Toh T., Mizoguchi Sh. Applied MHD in the Process of Continuous Casting. *Magneto hydrodynamics in Process Metallurgy : Proceedings of Symposium, San Diego, California, USA, March 1–5. 1992*. Pp. 189–202.
7. Dubodelov V. I. [et al.]. Improvement of continuous steel casting technology through the use of original magnetodynamic equipment [Uovershenstvovanie tekhnologii nepreryvnoj razlivki stali za schet primeneniya original'nogo magnitodinamicheskogo oborudovaniya]. *Processy lit'ya*. 2006. No. 1. Pp. 7–15.
8. Kuberskii S. V. Hydraulic calculation of the tundish continuous casting machine with electromagnetic stirrer [Gidravlicheskij raschet promezhutochnogo kovsha MNLZ, oborudovannogo elektromagnitnym peremeshivatelem]. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2013. Iss. 40. Pp. 87–95.
9. Essel'bah S. B. [et al.]. Electromagnetic fusion processing: monograph [Elektromagnitnaya obrabotka rasplavov : monografiya]. *Alchevsk : DonSTU*. 2007. 138 p.
10. Essel'bah V. S., Essel'bah S. B., Kuberskii S. V. Mathematical model for calculating electromagnets used in the treatment of high-temperature melts [Matematicheskaya model' rascheta elektromagnitov, ispol'zuemyh pri obrabotke vysokotemperaturnyh rasplavov]. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2008. Iss. 26. Pp. 205–210.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuberskii Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies

Donbass State Technical University

Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru