

УДК 669.18:621.745.56:519.56

**В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, А.Б.Ковура, А.А.Травинчев,
С.Н.Павлов, И.Л.Бузун, В.А.Кондрашкин**

**ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СО-
СТОЯНИЯ КОВШЕВОЙ ВАННЫ БОЛЬШОЙ ЕМКОСТИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА НА УКП**

*Институт черной металлургии НАН Украины, *ОАО «МК «Азовсталь»*

Целью работы являлось изучение возможности использования математического моделирования для исследования поведения расплава в объемах агрессивных сред (жидкого металла и шлака) в условиях невозможности отбора проб и замера температур расплава. Приведены данные для численного исследования тепловых процессов в металлической ванне установки ковш–печь (УКП) с емкостью ковша 350 т. Выбор исходных данных осуществлен с использованием статистических и расчетно–аналитических методов.

установка ковш–печь, металлическая ванна, жидкий металл и шлак, тепловые процессы, математическое моделирование

Состояние вопроса. В условиях увеличения масштабов использования установок ковш–печь (УКП) и сохраняющейся мировой тенденции повышения цен на используемые при производстве стали ресурсы, актуальность поиска рациональных энерготехнологических режимов внепечной обработки приобретает особое значение. Однако в проблеме использования УКП, которые характеризуются общепромышленной значимостью и обеспечивают снижение уровня ресурсо– и энергопотребления, имеется весьма существенная по масштабам (и пока практически не занятая) область, связанная с разработкой технических решений и мероприятий по рационализации режимов эксплуатации и улучшению показателей работы этих агрегатов.

Цель работы. Изучение возможности снижения расхода дорогостоящего аргона, экономии раскислителей и легирующих, снижения расхода огнеупоров для футеровки ковшей, а также уменьшения затрат электроэнергии для нагрева металла и поддержания необходимого теплового состояния расплава.

Постановка задачи. В связи с высоким агрессивным характером исследуемых сред, сложностью, а в ряде случаев и невозможностью отбора проб и замера температур в объемах расплава (жидкий металл и шлак), в качестве метода исследований было выбрано математическое моделирование. Численное исследование теплового состояния ковшевой ванны при обработке на УКП с учетом дугового нагрева проведено по исходным данным ИЧМ НАНУ, с помощью разработанной в Днепропетровском государственном техническом университете усовершенствованной трехмерной математической модели гидродинамики и тепло–, массообмена [1,2], реализованной в программной среде DELPHI.

Выбор исходных данных для исследования тепло–, массообменных процессов в расплаве при обработке на УКП осуществляли на основе анализа научно–технических публикаций, обобщения производственных

данных, учета компоновочных особенностей оборудования и опыта эксплуатации установок данного типа на отечественных металлургических предприятиях.

Изложение основных исходных данных. Приведенные ниже энергосиловые параметры модуля нагрева У КП (табл.1) выбраны по паспортным и фактическим (экспериментальным) данным или вычислены по известным зависимостям [3–5]. Геометрические размеры ковша, его компоновочные особенности, режимы продувки аргоном, а также свойства жидкой стали и шлака, использованные в исследованиях, представлены в статье [6]. При исследовании процессов, происходящих при обработке стали на У КП, определены представительные по группам марки стали: низколегированные – ASTM A36; низкокремнистые – B040; углеродистые – RPSTP–1; штрипсовые – X60(Nb,V).

Таблица 1. Основные энергосиловые параметры модуля нагрева У КП

Степень трансформатора	Полная мощность, МВ·А	Активная мощность, МВт	Скорость нагрева, °С/мин	Сила тока, кА	Напряжение, В	Плотность тока, А/см ²	cos φ	Длина дуги, мм	Диаметр электродов, мм	Диаметр расплава электродов, мм
10	40,31	31,03	0,0	56,6	411	27,94	0,77	140	508	950
12	42,02	31,54	н.д.	56,6	429	27,94	0,75	145		
14	43,88	32,94	1,0	56,6	448	27,94	0,75	150		
16	45,00	33,27	2,0	55,5	468	27,38	0,74	160		
18	45,00	34,64	3,0	52,9	491	26,11	0,77	170		
19	45,00	35,07	н.д.	51,6	503	25,47	0,78	180		
20	45,00	35,08	4,0	50,3	516	24,84	0,78	190		
21	45,00	35,57	н.д.	49,0	530	24,21	0,79	195		

Примечание: н.д. – нет данных;

В табл.2 приведены дополнительные исходные данные для расчета тепловых процессов в ковше при обработке на У КП. В табл. 3 приведены данные о марочном химическом составе и температуре ликвидус представленных марок стали.

Обработка на У КП, в зависимости от марки и назначения стали, предусматривает проведение ряда технологических операций: рафинирование, раскисление, микролегирование, доводка по химическому составу и температуре и др. Указанные операции осуществляются, в частности, за счет ввода добавок в ванну, ее перемешивания инертным газом и нагрева электрической дугой. В плане тепловой работы У КП, время обработки стали необходимо разделять на два периода: 1) нагрев расплава электрической дугой с одновременной продувкой аргоном – прирост температуры; 2) обработка расплава аргоном и доводка по составу – снижение температуры. На практике, в большинстве случаев, четкое разделение на вы-

шеуказанные периоды отсутствует (рис.1,а). Это связано с принятыми технологическими схемами и трудностями прогнозирования в производственных условиях требуемого расхода электроэнергии, обеспечивающего заданную температуру стали в конце обработки на УКП перед подачей ее на разливку. Для упрощения тепловых расчетов принята идеализированная схема обработки (рис.1,б), предусматривающая дифференциацию периодов дугового нагрева и доводки по химическому составу с одновременной продувкой аргоном без нагрева, где $\tau_{\text{нагр.}} = \tau'_1 + \tau'_2 + \dots + \tau'_n$.

Таблица 2. Дополнительные исходные данные для численного исследования тепловых процессов (приведенные данные соответствуют средним статистическим значениям каждого параметра, полученного по отобраным массивам паспортов плавок)

Марка стали	Масса плавки, т	Температура металла на УКП, °С		Продолжительность этапов обработки расплава на УКП, мин			Расход аргона, л/плавку	Расход электроэнергии, кВт·час/плавку
		Исходная	Конечная	Аргон (без нагрева)	Электрической дугой	Общая продолжительность обработки		
ASTM A36	342	1575	1570	49,0	13,3	62,3	26490	7314
B040	337	1602	1588	58,7	11,3	70,0	26856	5988
RPSTP-1	344	1588	1575	48,3	12,8	61,1	25596	6872
X60(Nb,V)	355	1579	1567	61,5	16,7	78,2	39562	8728

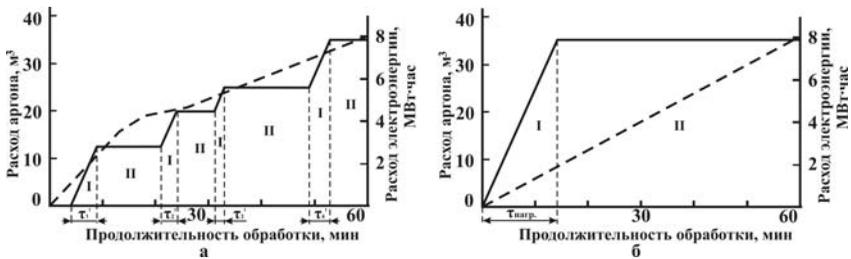


Рис. 1. Фактическое (а) и идеализированное (б) изменение общего расхода аргона (---) и электроэнергии (—) за время обработки представительной плавки (№1807375) полупродукта стали ASTM A36 на УКП. I – дуговой нагрев; II – обработка аргоном без нагрева.

Таблица 3. Химический (марочный) состав и температура ликвидус представительных (по группам) марок стали

Марка ста- ли	Содержание элемента, % масс.															T _л ^{*)}
	C	Mn	Si	Al	S	P	Cr	Ni	Nb	V	Mo	Ti	Cu	N	B	
	не более или в пределах															
ASTM A36	0,12– 0,16	0,80– 1,0	0,15 – 0,40	0,020– 0,050	0,015	0,020	0,30	0,30	–	–	–	0,030	0,20	0,008	–	1519
B040	0,03– 0,06	0,20– 0,33	0,03	0,020–0, 060	0,015	0,020	0,07	0,07	0,005	0,005	0,01	0,005	0,07	0,008	0,005	1532
RPSTP–1	0,13– 0,17	0,60– 0,80	0,10– 0,30	0,020–0, 060	0,015	0,020	–	–	–	–	–	–	–	0,010	0,0008	1522
X60(Nb,V)	0,08– 0,12	1,20– 1,40	0,16– 0,35	0,020– 0,060	0,005	0,020	0,25	0,25	0,020– 0,040	0,045– 0,060	0,3	0,012– 0,020	0,30	0,010	–	1519

*) T_л – температура ликвидус, определенная по данным [7];

В первом периоде обработки расплава – периоде нагрева электрической дугой, подводимая активная мощность ($P_{\text{акт.}}$) расходуется (рис.2) на потери в короткой сети и электродах ($\eta_{\text{эл.}} \cdot P_{\text{акт.}}$), потери при преобразовании электрической энергии в дугу ($\eta_{\text{дуг.}} \cdot P_{\text{акт.}}$), потери излучением дуги на электроды, боковые стенки, зазор крышка УКП–ковш, свод ($\eta_{\text{изл.д.}} \cdot P_{\text{акт.}} = \eta_{\text{изл.д.эл.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.б.с.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.зав.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.св.}} \cdot P_{\text{акт.}}$), остальная часть энергии усваивается металлом ($\eta_{\text{усв.Ме}} \cdot P_{\text{акт.}}$). В то же время принято, что та часть подводимой мощности, которая усваивается расплавом, одновременно компенсирует тепловые потери расплавом через футеровку ковша – $\eta_{\text{фут.}} \cdot P_{\text{акт.}}$, излучением с поверхности – $\eta_{\text{изл.}} \cdot P_{\text{акт.}}$, с отходящими газами – $\eta_{\text{отх.газ.}} \cdot P_{\text{акт.}}$ и идет на повышение температуры жидкого металла – $\eta_{\text{Ме}} \cdot P_{\text{акт.}}$, то есть, $\eta_{\text{усв.Ме}} \cdot P_{\text{акт.}} = \eta_{\text{фут.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{отх.газ.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{Ме}} \cdot P_{\text{акт.}}$.

Тогда балансовое уравнение во время нагрева электрической дугой приобретает следующий вид:

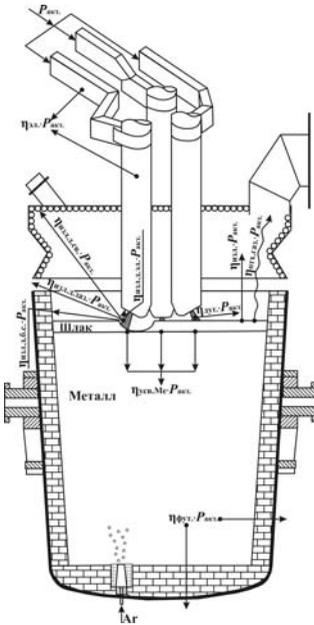
$$P_{\text{акт.}} = \eta_{\text{эл.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{дуг.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.эл.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.б.с.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.зав.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.д.св.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{фут.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{изл.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{отх.газ.}} \cdot P_{\text{акт.}} + \eta_{\text{Ме}} \cdot P_{\text{акт.}}$$

С учетом вышеизложенного, прирост температуры ΔT ($^{\circ}\text{C}$) стали массой $M_{\text{Ме}}$ (кг) с теплоемкостью $C_{p\text{Ме}}$ (Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$) за некоторый период обработки дугой τ'_n (с) составит:

$$\Delta T = \frac{\eta_{\text{Ме}} \cdot P_{\text{акт.}} \cdot \tau'_n}{M_{\text{Ме}} \cdot C_{p\text{Ме}}} \quad (1)$$

При этом скорость нагрева расплава V ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$) определяется как:

$$V = \frac{\Delta T}{\tau'_n} \quad (2)$$



Необходимо отметить, что интенсивность перемешивания аргоном, вызывающая дополнительные теплотери излучением с поверхности расплава вследствие увеличение ее площади и прямо пропорционально влияющая на скорость охлаждения металла [8], на этапе нагрева также влияет на коэффициент усвоения активной мощности ($\eta_{\text{усв.Ме}}$) [9].

Рис. 2. Схема энергетического баланса УКП во время обработки расплава электрической дугой

Во втором периоде обработки расплав охлаждается, так как существующий приход тепла за счет протекания экзотермических реакций окисления примесей незначителен.

В связи с тем, что теплопроводность шлака, огнеупоров и аргона на 1–3 порядка ниже, чем жидкого металла, в расчетах принято, что тепловой эффект от взаимодействия твердых добавок с металлом способствует изменению только температуры стали в ковше [8]. В этот период происходит охлаждение металла за счет потери тепла через футеровку ковша, излучением с поверхности ванны и с отходящими газами при продувке аргоном – $\Delta T_{\text{п}}$ (эта величина зависит от времени обработки расплава без учета периода нагрева, а также интенсивности продувки аргоном), за счет ввода корректирующих и раскисляющих добавок – $\Delta T_{\text{доб}}$, шлакообразования – $\Delta T_{\text{шл.}}$. В расчетах необходимо учесть разницу между конечной и исходной температурами расплава – $\Delta T_{\text{Ме}}$. В итоге, во втором периоде обработки стали суммарная потеря температуры расплавом составит:

$$N = \Delta T_{\text{п}} + \Delta T_{\text{Доб}} + \Delta T_{\text{Шл}} + \Delta T_{\text{Ме}} \quad (3)$$

Исходя из вышеприведенных выражений (1–3) требуемая расчетная продолжительность обработки расплава электрической дугой $\tau_{\text{нагр.}}$ (с) и величина подводимой активной мощности $P_{\text{акт.}}$ (Вт), необходимой для формирования рафинирующего шлака, плавления (растворения) добавок, компенсации тепловых потерь расплава и его подогрева до необходимой на разливке температуры, определяется по нижеприведенным зависимостям:

$$\tau_{\text{нагр.}} = \frac{N}{V} \quad (4)$$

$$P_{\text{акт.}} = \frac{C_{\text{рМе}} \cdot M_{\text{Ме}} \cdot N}{\eta_{\text{Ме}} \cdot \tau_{\text{нагр.}}} \quad (5)$$

Влияние охлаждающего эффекта от ввода кусковых добавок определяли по данным [8] с уточнениями. Охлаждение за счет ввода проволочно–порошковых добавок рассчитывалось как алгебраическая сумма потерь температуры металлом на нагрев и плавление наполнителя и стальной оболочки. Расчет потерь тепла от ввода ТШС осуществляли со следующими допущениями: температура взаимодействия компонентов смеси со сталью в ковше – 1600⁰С; в процессе формирования шлака, поступающий из СаF₂ в ванну фтор частично удаляется из смеси в результате выделения газообразного фторида кремния; поступающий из ТШС кремнезем расходуется на образование SiF₄, а его остаток усваивается шлаком, образующийся оксид кальция полностью переходит в шлак; поступающие в шлак продукты раскисления и износа футеровки уже нагреты до температуры жидкой стали. Тепловые затраты при формировании шлака состоят из суммы энтальпий нагрева компонентов смеси до температуры жидкой стали в ковше, скрытой теплоты их плавления, а также тепловых эффектов реакций образования фторида кремния и сложных оксидов. Для условий ККЦ ОАО «МК «Азовсталь» скорость охлаждения металла в период аргоновой обработки по данным [8, 10] принята в пределах 0,5 – 1,8 ⁰С/мин. Результаты расчетно–аналитической оценки тепловых потерь за счет ввода добавок приведены в табл.4.

Выводы. С использованием статистических и расчетно–аналитических методов определены основные исходные данные для численного исследования теплового состояния ковшевой ванны емкостью 350 т при обработке расплава на УКП.

Результаты исследований тепло–, массообменных процессов в комплексе с численно изученной гидродинамикой ковшевой ванны УКП будут использованы для обоснования рациональных режимов рафинирования и доводки металлического расплава по составу и температуре на обродовании такого типа и мощности.

Табл.4. Тепловые потери расплава за счет ввода добавок при производстве на УКП стали марок ASTM A36, B040, RPSTP-1, X60(Nb,V) Примечание: *) CaO, CaF₂, ИРС и ТИС; **) минус – снижение, плюс – повышение температуры.

Марка стали	Наименование и марка добавки	Расход добавки, кг/т	Изменение температуры металлического расплава от ввода 1 кг/т добавки, °С	Тепловые потери металлического расплава за счет вводимых добавок, °С
ASTM A36	Шлакообразующие*)	3,60	-3,27	-11,77
	ФМн78	1,00	-1,77	-1,77
	ФС65	0,66	+0,62	0,41
	Al _{гран.}	0,05	+9,96	0,50
	C _{пр.}	0,21	-7,30	-1,53
	SiCa _{пр.}	0,56	-0,29	-0,16
	Al _{пр.}	0,37	+2,22	0,82
	Итого:			-13,51
B040	Шлакообразующие*)	4,02	-3,20	-12,86
	Мн965	0,71	-1,66	-1,18
	Al _{гран.}	0,15	+9,96	1,49
	C _{пр.}	0,03	-7,30	-0,19
	Al _{пр.}	0,72	+2,22	1,60
	Итого:			-11,13
RPSTP-1	Шлакообразующие*)	3,68	-3,28	-12,06
	ФМн78	0,77	-1,77	-1,36
	ФС65	0,61	+0,62	0,38
	Al _{гран.}	0,02	+9,96	0,23
	C _{пр.}	0,25	-7,30	-1,83
	SiCa _{пр.}	0,56	-0,29	-0,16
	Al _{пр.}	0,39	+2,22	0,87
	Итого:			-13,94
X60(Nb, V)	Шлакообразующие*)	4,01	-3,18	-12,74
	ФТи30	0,77	-0,68	-0,52
	ФС65	0,57	+0,62	0,35
	Мн965	0,85	-1,66	-1,41
	Al _{гран.}	0,03	+9,96	0,30
	C _{пр.}	0,21	-7,30	-1,53
	SiCa _{пр.}	1,11	-0,29	-0,32
	Al _{пр.}	0,29	+2,22	0,64
	FeNb _{пр.}	0,38	-1,33	-0,51
	FeV _{пр.}	0,39	-1,64	-0,64
	Итого:			-16,38

1. *Влияние* постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш–печь. Ч.2. Модель массопереноса / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – №4–5. – С.14 – 17.
2. *Исследование* тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш печь. Ч.1 Математическая модель / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А.Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2008. – №3. – С.3–5.
3. *Выбор* параметров трансформатора для агрегата ковш–печь и режимы обработки стали / Н.Ф. Ахметшин, И.Ю. Зинуров, В.С. Галян и др. // Электрометаллургия. – 2001. – №10. – С.23–26.
4. *Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.М.*, Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1971. – 344 с.
5. *Макаров А.Н.* Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах: Учебное пособие. –Тверь: ТГТУ, 1998. – 184 с.
6. *Данные* для моделирования гидродинамики ковшевой ванны большой емкости при обработке расплава на УКП / В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, А.Б. Ковура и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2008. – Вып. 18. –С.115 – 121.
7. *Трубин К.Г., Ойкс Г.Н.* Металлургия стали. –М.: Металлургиздат, 1957.–714 с.
8. *Вихлевщук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С.* Ковшевая доводка стали: – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
9. *Ерофеев М.М., Аганитов Е.Б.* Математическое моделирование нестационарного перемешивания стали в агрегате ковш–печь // Электрометаллургия. – 2008. – №8. – С.32–36.
10. *Производство* стали на агрегате ковш–печь / Д.А.Дюдкин, С.Ю.Бать, С.Е.Гринберг, С.Н.Маринцев. – Донецк: ООО «Юго–Восток» ЛТД, 2003. – 300с.

*Статья рекомендована к печати:
заместитель ответственного редактора
раздела «Сталеплавильное производство»
докт.техн.наук, проф. Э.В.Приходько
рецензент канд.техн.наук В.П.Корченко*

***В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, А.Б.Ковура, А.А.Травінчев, С.Н.Павлов,
І.І.Бузун, В.О.Кондрашкін***

Дані для чисельного дослідження теплового стану ковшової ванни великої місткості при обробці розплаву на УКП

Метою роботи було вивчення можливості використання математичного моделювання для дослідження поведінки розплаву в об'ємах агресивних середовищ (рідкого металу і шлаку) в умовах неможливості відбору проб та заміру температур розплаву. Приведено дані для чисельного дослідження теплових процесів в металевій ванні установки ковш–піч (УКП) з місткістю ковша 350 т. Вибір початкових даних здійснено з використанням статистичних та розрахунково-аналітичних методів.