

**В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, С. Е. Самохвалов*, И. А. Павлюченков*,
И. В. Крикент*, И. Н. Логозинский**, Е. Н. Дымченко***,
С. В. Греков, А. Г. Чичерин**

Институт черной металлургии НАН Украины, Днепропетровск

*Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск

**ОАО «Днепроспецсталь», Запорожье

***ОАО «Енакиевский металлургический завод», Енакиево

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВАННЕ УСТАНОВКИ КОВШ-ПЕЧЬ

Приведены данные для разработки трехмерной математической модели тепло-, массообмена и численного исследования тепловых процессов в металлической ванне установки ковш-печь переменного и постоянного тока разной мощности.

Наведено дані для розробки тривимірної математичної моделі тепло-, масообміну і чисельного дослідження теплових процесів в металевій ванні установки ківш-піч змінного і постійного струму різної потужності.

Data for development of three-dimensional mathematical model heat-, mass-exchange and numeral research of thermal processes in metallic bath of AC/DC ladle-furnace of different power.

Ключевые слова: параметры, тепловой процесс, установка ковш-печь.

Поиск рациональных технологических компоновочных схем, обеспечивающих экономное использование материальных и энергетических ресурсов при изготовлении высококачественной конкурентоспособной металлопродукции, является актуальной научно-технической задачей, стоящей перед инженерным персоналом сталеплавильных и сталелитейных предприятий. Рост установок ковш-печь (УКП) типов LF и LHF, ежегодно вводимых в эксплуатацию, обуславливает дополнительное потребление электроэнергии, аргона, материалов-добавок (далее добавок) и необходимость поиска вариантов снижения их расхода. В условиях сохраняющейся мировой тенденции повышения цен на используемые при производстве стали ресурсы актуальность решения вышеуказанной задачи приобретает особое значение.

Несмотря на имеющиеся сведения об эффективности применения УКП, данные о тепловой стороне их работы изучены мало, а по некоторым материалам они противоречивы. Так, например, неоднозначна оценка тепловых потерь расплава при обработке на УКП. Рассматривая статьи теплового баланса работающей УКП, авторы работы [1] отмечают, что на нагрев металла и шлака расходуется часть вводимой мощности за исключением следующих потерь: в короткой сети, с поверхности расплава, через футеровку ковша и добавок, расходуемых на нагрев и плавление. В то же время в работах [2, 3], кроме вышеуказанных, приводятся дополнительные статьи тепловых потерь на УКП (например, с отходящими газами и охлаждающей водой), величина которых колеблется в пределах 4–29 %. Значение теплового КПД установок ковш-печь по этим данным находится в пределах 43–47 % и превышает среднюю величину этого параметра [1].

Необходимость изучения теплового состояния ванны при обработке расплава на УКП обусловлена также отсутствием единого мнения среди исследователей в оценке величины температурного перепада в металлической и шлаковой фазах [4], знание которых позволит не только прогнозировать продолжительность и параметры гомогенизации расплава по температуре, но и обеспечить рациональные их режимы.

Изучение особенностей теплового состояния УКП и установление необходимых для усовершенствования режимов эксплуатации параметров экспериментальными методами крайне затруднительны, а иногда и невозможны. Поэтому большинство исследователей

идет по пути использования математического моделирования, применение которого эффективно только при наличии достоверных исходных данных. В этом вопросе, как показывает обзор литературы, также нет единого мнения, а зачастую необходимые данные вообще отсутствуют и их принимают произвольно, что естественно снижает точность получаемых результатов.

Задачей этой статьи является устранение в возможной степени этого недостатка. В ней приводятся необходимые исходные данные, полученные в результате специальных экспериментов, а также расчетов по наиболее прогрессивным методикам, либо формулы, по которым эти сведения могут быть получены.

Приведенные ниже данные использованы авторами при разработке усовершенствованной трехмерной математической модели тепло-, массообмена [5] и при численном исследовании тепловых процессов в ванне УКП переменного и постоянного тока разной мощности, а также могут быть использованы другими исследователями, занимающимися аналогичной проблемой. Для лучшего восприятия приведены примеры их использования.

На рис. 1 представлен общий вид УКП переменного и постоянного тока, для которых производились упомянутые расчеты.

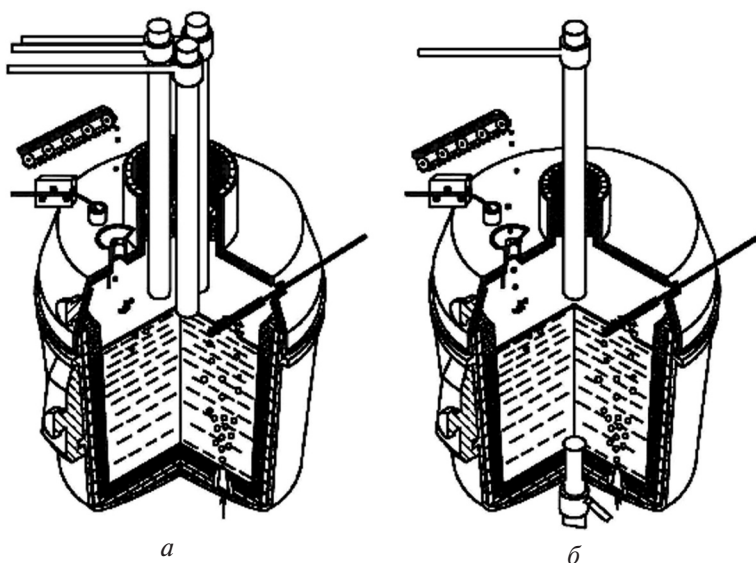


Рис. 1. Общий вид УКП переменного (а) и постоянного (б) тока

Совмещенные компоновочные схемы крышек установок и днищ ковшей УКП переменного и постоянного тока с емкостью (по металлу) 60 т (УКП-60) и аналогичные данные УКП переменного тока с емкостью (по металлу) 140 т (УКП-140) с основными размерами приняты по данным работ [6, 7]. На рис. 2 в качестве примера приведена совмещенная компоновочная схема рассмотренной УКП-140 постоянного тока. Расположение технологических отверстий в крышке такой установки аналогично эксплуатируемым на ЕМЗ УКП-140 переменного тока, а их размеры, основные параметры ковша и продувочных фурм соответствуют данным работы [7]. Диаметр электродов модуля нагрева УКП-140 постоянного тока определяли расчетным методом по [6].

Схема работы модуля нагрева УКП разного типа приведена на рис. 3. Основные энергосиловые параметры модулей нагрева

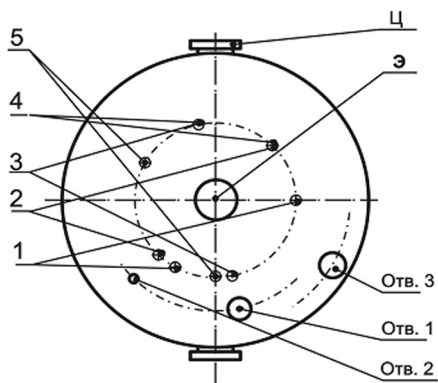


Рис. 2. Совмещенная компоновочная схема крышки установки и днища ковша УКП-140 постоянного тока: отв. 1-3 – отверстия в крышке для ввода кусковых добавок, проволочек и замера температуры соответственно; Ц и Э – цапфа ковша и электрод модуля нагрева; 1-5 – варианты расположения 2-донных продувочных фурм

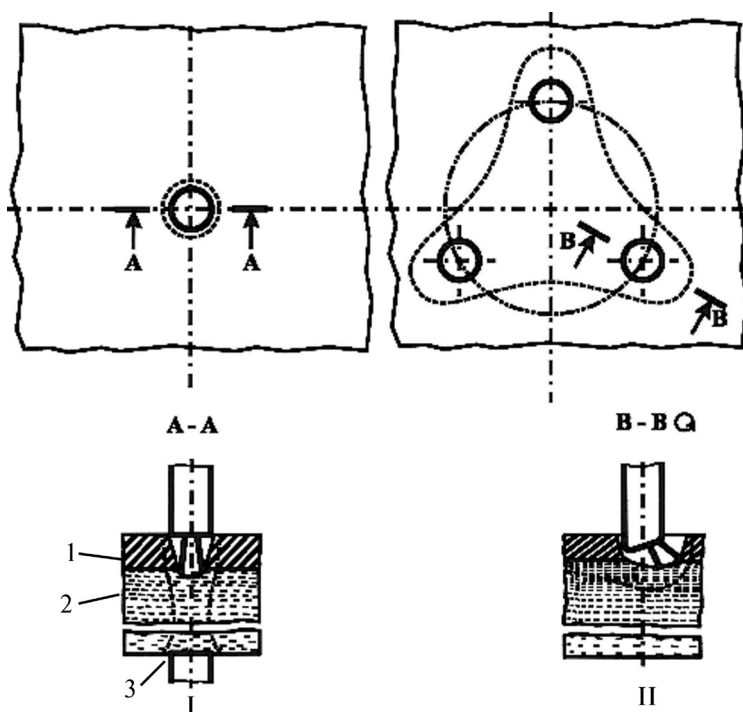


Рис. 3. Схема работы модуля нагрева УКП постоянного (I) и переменного (II) тока: 1 - шлак; 2 - металл; 3 - диаметр распада электродов; - - - - зона электромагнитного перемешивания

рассматриваемых УКП, принятые в качестве исходных, приведены в табл. 1. Для УКП переменного тока взяты практически используемые значения энергосиловых параметров, а для УКП постоянного тока – расчетные значения.

Значения плотности тока (табл. 1) для УКП постоянного тока получены для принятого диаметра электродов. Поэтому приведенные ее значения отличаются от аналогичного параметра, указанного в работе [6].

В табл. 2 на примере УКП-60 и УКП-140 разного типа приведены расчетные значения тепловых потерь металлического расплава при продувке его аргоном. В расчетах использовали усредненные значения расхода аргона на одну плавку стали указанных марок. Усреднение данных производили по промышленным плавкам стали марок 57-109 (ДСС) и 335(ЕМЗ).

Величина скорости потерь теплоты расплавом принята по данным действующих технологических инструкций ДСС и ЕМЗ (ТИ 143-С-17-04, 235-МНЛЗ-04-2004 соответственно).

Обработка на УКП полупродукта производства стали (в зависимости от марки и назначения) предусматривает проведение ряда технологических операций: рафинирование, раскисление, легирование, модифицирование, доводка по химическому составу, температуре и др. Указанные операции осуществляются, в частности, за счет ввода добавок в ванну, ее перемешивания инертным газом и нагрева электрической дугой. Добавки вводят в кусках по соответствующим трактам подачи или (в некоторых случаях) в порошкообразном виде инжeksiрованием в струе несущего газа. Значительная часть добавок вводится в виде порошковых проволок или проволоки (катанки) сплошного сечения (например, алюминий первичный) с помощью трайб-аппарата.

Требуемую продолжительность обработки расплава электрической дугой и величину теплового потока для ускоренного формирования рафинирующего шлака, плавления (растворения) добавок, компенсации тепловых потерь расплава и его подогрева до

Таблица 1. Энергосиловые параметры модулей нагрева УКП разного типа и мощности

Тип УКП	Ступень трансформатора	Мощность, МВт	Диаметр, мм / количество электродов, шт	Скорость нагрева, °С/мин	Сила тока, кА	Напряжение, В	Плотность тока, А/см ²	cos φ	Диаметр распада электродов, мм	
УКП-60 постоянного тока	16	3,80	$\frac{350}{2}$	2,1	19,3	196,5	20,1	-	-	
	14	5,60		3,3	26,2	214,0	27,3			
	12	7,70		4,3	32,8	235,0	34,1			
	10	9,30		5,0	35,3	263,5	36,7			
УКП-60 переменного тока	16	3,80	$\frac{350}{3}$	2,1	12,0	196,5	12,5	0,94	650	
	14	5,60		3,3	17,0	214,0	17,7			0,89
	12	7,70		4,3	22,5	235,0	23,4			0,84
	10	9,30		5,0	24,0	263,5	25,0			0,86
УКП-140 постоянного тока	1	9,60	$\frac{450}{2}$	1,3	37,2	258,3	23,4	-	-	
	2	10,15		1,8	39,0	260,5	24,5			
	4	14,04		3,3	45,5	308,8	28,6			
	5	16,44		3,8	48,7	337,5	30,6			
	1	9,60		1,3	29,0	258,3	18,2			0,74
УКП-140 переменного тока	2	10,15	$\frac{450}{3}$	1,8	30,0	260,5	18,9	0,75	850	
	4	14,04		3,3	35,0	308,8	22,0			0,75
	5	16,44		3,8	38,0	337,5	23,9			0,74

необходимой на разливке температуры оценивали расчетным методом с использованием нижеприведенных зависимостей:

$$\tau = \frac{\Delta T}{V}; \quad (1)$$

$$\Delta T = \Delta T_{\text{ме}} + \Delta T_{\text{шл}} + \Delta T_{\text{доб}}; \quad (2)$$

$$P_{\text{акт}} = \frac{C_{\rho\text{ме}} \cdot M_{\text{ме}} \cdot N}{\eta_{\text{ме}} \cdot \tau}; \quad (3)$$

$$N = \Delta T + \Delta T_{\text{п}}, \quad (4)$$

где τ – продолжительность обработки расплава электрической дугой, мин; V – скорость на-

Получение и обработка расплавов

Таблица 2. Тепловые потери металла при продувке аргоном на У КП переменного и постоянного тока

Тип У КП	Марка стали	Усредненный расход аргона, л/плавку	Усредненный расход аргона на У КП (У КП и вакууматоре), л/мин	Скорость потерь теплоты расплавом, °С/мин	Тепловые потери на У КП (У КП и вакууматоре), °С*
У КП-60 постоянного и переменного тока	ШХ15	5335	(85)	1,0	(43)
	17Г1С	3120	(78)		(34)
	85Г	1240	62		9
У КП-140 постоянного и переменного тока	Зсп	13450	280 (на две фурмы)	0,5	12

* Приведены тепловые потери при продувке аргоном в период обработки на У КП (У КП и вакууматоре) без учета времени обработки расплава электродугой

грева металла, °С/мин; ΔT – расчетное изменение температуры металла на шлакообразование, нагрев и плавление корректирующих и раскисляющих добавок с учетом его требуемого перегрева, °С; $\Delta T_{\text{ме}}$ – требуемый перегрев металла до заданной температуры, °С; $\Delta T_{\text{шл}}$ – потери металлом температуры на шлакообразование, °С; $\Delta T_{\text{доб}}$ – потери металлом температуры на нагрев и плавление корректирующих и раскисляющих добавок, °С; $M_{\text{ме}}$ – масса металла в ковше, кг; $\eta_{\text{ме}}$ – коэффициент усвоения металлом подводимой мощности; N – общие тепловые потери металлом, °С; $\Delta T_{\text{п}}$ – потери металлом температуры через футеровку ковша, поверхность ванны и с отходящими газами при продувке аргоном, °С; $C_{\text{рме}}$ – теплоемкость жидкой стали, Дж/(кг · °С); $P_{\text{акт}}$ – активная электрическая мощность, Вт.

Таблица 3. Тепловые потери расплава за счет ввода добавок при производстве на У КП-60 (сталь марок ШХ15, 17Г1С, 85Г) и У КП-140 (сталь марки Зсп) переменного и постоянного тока (минус – снижение температуры, плюс – повышение)

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
1	2	3	4	5
ШХ 15	ТШС на основе извести и плавикового шпата	14,96	-3,17	-47,42
	Кокс кусковый	1,57	-4,23	-6,64
	Ферромарганец ФМн78 кусковый	1,58	-1,77	-2,80
	Феррохром кусковый ФХ800	6,50	-3,94	-25,61
	Ферросилиций ФС65 кусковый	1,31	+0,62	+0,81
	Науглероживатель порошковый в проволоке	0,83*	-6,47**	-5,37
	Алюминиевая катанка	1,05	+2,22	+2,33
	Итого:			

Получение и обработка расплавов

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5
17Г1С	ТШС на основе извести и плавикового шпата	19,50	-3,17	-61,82
	Ферромарганец ФМн78 кусковый	1,00	-1,77	-1,77
	Ферросилиций ФС65 кусковый	1,50	+0,62	+0,93
	Ферротитан ФТи30 кусковый	1,00	-0,68	-0,68
	Силикокальций СК30 порошковый в проволоке	1,00*	+0,33**	+0,33
	Науглероживатель порошковый в проволоке	0,20*	-6,47**	-1,29
	Алюминиевая катанка	0,15	+2,22	+0,33
	Итого:			-63,97
85Г	Ферромарганец ФМн78 кусковый	1,00	-1,77	-1,77
	Науглероживатель порошковый в проволоке	0,50*	-6,47**	-3,24
	Ферросилиций ФС65 кусковый	0,50	+0,62	+0,31
	Итого:			-4,70
3 сп	ТШС на основе извести, плавикового шпата и алюмофоса	11,58	-2,62	-30,27
	Кокс кусковый и порошковый	0,46	-4,23	-1,96
	Ферромарганец ФМн78 кусковый	0,76	-1,77	-1,35
	Силикомарганец СМн17	0,88	-0,81	-0,72
	Ферросилиций ФС65 кусковый	1,12	+0,62	+0,70
	Науглероживатель порошковый в проволоке	0,27*	-6,47**	-1,77
	Силикокальций СК30 порошковый в проволоке	0,32*	+0,33**	+0,11
	Алюминиевая катанка	0,08	+2,22	+0,18
	Итого:			-35,09

*Приведен расход материала-наполнителя порошковой проволоки, кг/т;

**Приведено изменение температуры металлического расплава от ввода 1 кг/т добавки с учетом металлической оболочки

Расчет потерь теплоты металлическим расплавом за счет ввода используемых добавок осуществляли по разработанной методике [8]. При этом использовали их физические и теплофизические свойства [9-11]. Для упрощения расчетов принимали, что перечень и количество добавок, вводимых на УКП, не зависят от типа установки и определяются только составом производимой марки стали. В табл. 3 на примере УКП разного типа и мощности представлены результаты вышеуказанных расчетов.

Таблица 4. Обобщенные исходные данные для численных исследований тепловых процессов в ваннах УКП

Тип УКП	Марка стали	Температура металла на УКП, °С		Продолжительность обработки ванны, мин				Тепловые потери, °С		
		исходная	конечная	на УКП аргоном	на УКП электродугой	на вакууматоре аргоном	при продувке аргоном*	за счет ввода добоков	за счет конвекции и излучения	
УКП-60 переменного и постоянного тока	ШХ15	1534	1633	63	47	27	16	85	Принято, что 43 % теплоты дуг усваивается металлом, 6,5 % - шлаком, а 50,5 % теряется через зеркало металла и футеровку	
	17ГС	1570	1600	40	26	20	14	64		
	85Г	1520	1550	20	11	-	9	5		
УКП-140 переменного и постоянного тока	3сп	1552	1586	48	24	-	12	35		

*Данные приведены для условий, аналогичных условиям, указанным в примечании к табл. 2.

Прогнозируемые тепловые потери металлического расплава в процессе обработки полупродукта при производстве вышеуказанных, а также представительных для ЕМЗ (Зсп) марок стали, которые должны компенсироваться электродуговым нагревом на УКП для обеспечения требуемых по температуре условий разливки металла на МНЛЗ или в изложницы, приведены в табл. 4.

Приведенные выше исходные данные использовали, как упоминалось ранее, при создании усовершенствованной трехмерной математической модели тепло-, массообмена ковшовой ванны при обработке расплава на УКП. Как показала экспериментальная проверка, их применение обеспечивает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Есть все основания считать, что результаты исследований тепло-, массообменных процессов, выполненных с использованием указанных исходных данных, могут быть использованы в комплексе с результатами численных исследований гидродинамики ковшовой ванны УКП разной мощности и типа, в частности, выполненных авторами в работах [12, 13], для обоснования рациональных режимов доводки металлического расплава по составу и температуре на таком оборудовании.



Список литературы

1. Динамическая модель теплоэнергетических процессов в электротермическом агрегате ковш-печь для создания АСУ / А. В. Жаданос, О. Н. Кукушкин, И. В. Деревянко и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 2, т. 3. – С. 64-69.
2. Кац Я. Л. Энергетическая эффективность нагрева стали при внепечной обработке / IV Международный конгресс сталеплавателей. – М.: ОАО “Черметинформация”, 1997. – С. 296-299.
3. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг, Н. Н. Маринцев. – Донецк: ООО “Юго-Восток” ЛТД, 2003. – 300 с.
4. Особенности современного оборудования и технология внепечной обработки стали / В. П. Пиптюк, В. Ю. Болотов, И. А. Павлюченков, И. Н. Логозинский // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2005. – Вып. 11. – С. 67-79.
5. Исследование тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Математическая модель / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2008. – № 3. – С. 3-5.

6. Исходные данные для моделирования массопереноса в ванне установки ковш-печь переменного и постоянного тока / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, И. А. Павлюченков и др. // Процессы литья. – 2007. – № 6. – С. 18-23.
7. Основные данные для численных исследований гидродинамики ванны на установках ковш-печь переменного тока разной мощности / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, И. Н. Логозинский // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2007. – Вып. 14. – С. 145-153.
8. Ковшовая доводка стали / В. А. Вихлевщук, В. С. Харахула, С. С. Бродский и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
9. Прогнозирование теплофизических свойств шлакообразующих смесей и их компонентов / Э. В. Приходько, В. П. Пиптюк, А. Ф. Хамхотько и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2006. – Вып. 13. – С. 196-203.
10. Физико-химическая оценка свойств промышленных ферросплавов / В. П. Пиптюк, А. Ф. Петров, С. В. Греков и др. // Там же. – 2007. – Вып. 14. – С. 236-244.
11. *Охотский В. Б.* Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 285 с.
12. Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Гидродинамика ванны / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 6. – С. 3-7.
13. Гидродинамика металлической ванны на установках ковш-печь переменного и постоянного тока / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // Металл и литье Украины. – 2008. – № 7-8. – С. 32-37.

Поступила 03.03.2009

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В редакции журнала «Процессы литья» Вы можете приобрести русско-украинский терминологический словарь «Металлургия».

Составители: **В. Л. НАЙДЕК, К. Ф. ЕВЛАШ, С. С. ЗАТУЛОВСКИЙ**

Словарь содержит около 14000 наиболее распространенных терминов и словосочетаний, относящихся к металлургии, литейному производству и термической обработке, а также к смежным областям науки и техники - металловедению, физике металлов, сварочному и кузнечному производствам.

Предназначен для преподавателей, студентов и аспирантов технических высших учебных заведений, сотрудников научно-исследовательских организаций материаловедческого профиля, инженерно-технических работников металлургических и родственных к ним специальностей.

Стоимость - 25 грн.

Заявки на приобретение словаря присылайте по адресу:

03680, Киев-142, пр. Вернадского, 34/1

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

Редакция журнала «Процессы литья»

Тел.: (044) 424-12-50; факс: (044) 424-35-15

E-mail: proclit@ptima.kiev.ua