

УДК 669.018.6 *Г.Н. Еланский¹, М.В. Шишимиров¹, О.М. Сосонкин¹, К.С. Филиппов²,
А.П. Сазонов¹, А.П. Крюков³, М.С. Добрикова¹*

1 – Московский государственный вечерний металлургический институт

2 – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова

3 – Московский энергетический институт

ИССЛЕДОВАНИЕ УГАРА ЖЕЛЕЗА В ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ И ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ

В современной технологии выплавки качественных сталей в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) произошли существенные изменения, связанные с повышением мощности трансформаторов, использованием водоохлаждаемых элементов и технологического кислорода для продувки, обработкой, по сути, полупродукта на установках ковш-печь с подогревом и интенсивной продувкой аргоном. Это отразилось на угаре металла в печи и подготовке металлического расплава к непрерывной разливке. Применяемые методы интенсификации технологических процессов превратили современную ДСП в агрегат для расплавления шихты с производительностью 80–150 т/ч. При этом на современных печах выход годного снизился до 88–85 %, т.е. увеличились потери металла (угар).

Высокие значения угара металла связаны с тем, что только небольшая часть теплоты, получаемой ванной от электрических дуг и в результате протекания экзотермических реакций окисления элементов расплава, усваивается массой металла, обладающего низкой теплоемкостью и теплопроводностью. Угар металла в зоне действия электрических дуг происходит за счет испарения с поверхности ванны внутри окружности, охватывающей электроды, поскольку температура поверхности ванны под стабильно горящими дугами практически в течение всей плавки равна температуре кипения металла.

При анализе процесса угара расплавленного металла испарением были приняты во внимание следующие особенности, определяющие направленность такого анализа. Известно, что плотность потока массы через межфазную поверхность жидкость–пар для стационарных условий определяется температурой этой границы раздела фаз и давлением паровой среды. Состав этой среды весьма существенно влияет на интенсивность испарения. В рассматриваемой проблеме поступающий тепловой поток должен распределяться так, чтобы минимальная его часть расходовалась на испарение металла, а максимально возможная на нагрев этого металла. Это требуемое сочетание может быть достигнуто при вполне определенных давлении и составе паровой фазы. Следует отметить, что рассматриваемая паровая фаза – сложная среда, состоящая из атомов и кластеров металла и газов, частиц пыли и

капель. Готовой методики для расчета интенсивности испарения металла в такую среду в настоящее время нет.

Решена модельная задача об испарении железа (основного компонента сталей) в среду собственного пара.

Для расчета интенсивности потока испарения в случае, когда давление паров железа вблизи и вдали от поверхности испарения практически совпадают или близки по значению, получена следующая зависимость:

$$j_p = 5/3(P_s - P_\infty)/(2\pi R_{Fe} \cdot T_s)^{1/2}, \quad (1)$$

где j_p – интенсивность потока испарения, кг/(м²·с); P_s – давление насыщенного пара железа, Па; P_∞ – давление паров железа вдали от поверхности испарения, Па; R_{Fe} – газовая постоянная для железа, Дж/(кг·К) ($R_{Fe} = R_m/M_{Fe} = 148,76$ Дж/(кг·К), где $R_m = 8314$ Дж/(кмоль·К); M_{Fe} – молярная масса железа, кг/кмоль); T_s – температура межфазной поверхности, К.

Расчет интенсивности потока испарения железа в среду собственного пара проведен для нескольких вариантов соотношения давления насыщенного пара железа вблизи и вдали от поверхности испарения: 1) $P_\infty = 0,9P_s$; 2) $P_\infty = 0,95P_s$; 3) $P_\infty = 0,99P_s$.

Результаты расчета интенсивности потока испарения железа в среду собственного пара для различных соотношений давлений паров железа вблизи и вдали от поверхности испарения в зависимости от температуры межфазной поверхности (по данным различных авторов температура кипения железа варьируется от 3000 до 3200 К) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета интенсивности потока испарения железа в среду собственного пара

T_s	3034	3040	3054	3080	3100	3134	3200	Примечание
j_p , кг/м ² ·с	9,90	9,95	10,46	11,79	12,93	14,71	19,18	$P_\infty = 0,9P_s$
j_p , кг/м ² ·с	4,95	4,97	5,23	5,90	6,46	7,35	9,59	$P_\infty = 0,95P_s$
j_p , кг/м ² ·с	0,99	0,995	1,05	1,18	1,29	1,47	1,92	$P_\infty = 0,99P_s$

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

– с увеличением температуры поверхности ванны в зоне контакта с дугой увеличивается мощность потока полезного тепла, расходуемого на нагрев металла, но в то же время увеличивается интенсивность потока испарения для всех соотношений давления паров железа вблизи и вдали от поверхности испарения;

– при приближении давления паров железа вдали от поверхности испарения к давлению насыщения паров железа вблизи поверхности испарения величина интенсивности потока испарения уменьшается.

Разработана методика расчета испарения в среду, содержащую посторонний (неконденсируемый) компонент.

В литературе приводится подход к решению задачи на случай интенсивной конденсации при наличии неконденсируемого компонента и соответствующая формула для приближенного аналитического расчета. Имея в виду, что в исследуемых ситуациях скорости движения образовавшегося пара значительно меньше скорости звука при температуре расплава, можно считать в первом приближении асимметрию испарения и конденсации для таких условий незначительной. Это допущение позволяет использовать упомянутое соотношение для расчета интенсивности испарения при наличии различных посторонних газов. В качестве посторонних газов при выплавке стали в ДСП были приняты воздух, поскольку испарение металла происходит в атмосфере печи, основной газовой составляющей которой и является воздух, а также широко используемый в черной металлургии инертный газ – аргон.

С учетом вышесказанного, определена интенсивность потока испарения в среду, содержащую посторонний компонент:

$$j_p = -5/3 [P_{1\infty} + 0,579P_{2\infty}(M_2/M_1) - P_s] / (2\pi R_{Fe} \cdot T_s)^{1/2}, \quad (2)$$

где $P_{1\infty}$ – давление насыщения паров железа, Па; $P_{2\infty}$ – давление постороннего компонента, Па; M_1 – молярная масса железа, кг/кмоль; M_2 – молярная масса постороннего компонента, кг/кмоль.

Расчет интенсивности потока испарения железа в среду, содержащую посторонний компонент, проведен для следующих соотношений давления между насыщенными парами железа и постороннего компонента (воздух, аргон): 1) $P_{1\infty} = 0,9P_s$ и $P_{2\infty} = 0,1P_s$; 2) $P_{1\infty} = 0,95P_s$ и $P_{2\infty} = 0,05P_s$. При этом $P_{1\infty} + P_{2\infty} = P_s$.

Результаты расчета интенсивности испарения железа в среду, содержащую посторонний компонент, при различных соотношениях давлений между парами железа и постороннего компонента (воздух, аргон) в зависимости от температуры межфазной поверхности представлены в табл. 2.

Анализ результатов расчетов приводит к выводам:

- интенсивность потока испарения железа в среду, содержащую посторонний компонент (воздух, аргон), значительно меньше, при том же значении температуры границы раздела фаз и давлении паров железа вдали от поверхности испарения, чем при испарении железа в среду собственного пара, причем применение аргона обеспечивает меньший угар железа;

- интенсивность потока теплоты, пошедшего на испарение, уменьшается при увеличении давления насыщения паров железа и давления воздуха при одинаковых температурах поверхности испарения.

Таблица 2

Результаты расчета интенсивности потока испарения железа в среде, содержащую посторонний компонент (воздух, аргон)

T_s	3034	3040	3054	3080	3100	3134	3200	Примечание
Воздух								
j_p , кг/м ² ·с	6,95	6,98	7,34	8,27	9,07	10,32	13,46	$P_{1\infty} = 0,9P_s$ $P_{2\infty} = 0,1P_s$
j_p , кг/м ² ·с	3,48	3,49	3,67	4,14	4,53	5,16	6,73	$P_{1\infty} = 0,95P_s$ $P_{2\infty} = 0,05P_s$
Аргон								
j_p , кг/м ² ·с	5,81	5,83	6,13	6,91	7,58	8,63	11,25	$P_{1\infty} = 0,9P_s$ $P_{2\infty} = 0,1P_s$
j_p , кг/м ² ·с	2,90	2,92	3,07	3,46	3,79	4,31	5,62	$P_{1\infty} = 0,95P_s$ $P_{2\infty} = 0,05P_s$

Проведено сравнение полученных расчетных данных с величиной угара металла под дугами (на плавках без продувки ванны газообразным кислородом) при эксплуатации ДСП–10 в условиях ЭФЛЦ ОАО ММЗ «Серп и молот». Установлено, что интенсивность угара металла под дугами в ДСП–10 составляет 5–7 кг/мин или 0,30–0,42 кг/м²·с. Отклонение расчетных данных от практических можно объяснить тем, что часть испарившегося железа поступает в шлак, а затем при раскислении шлака возвращается обратно в ванну металла.

На основании данных, полученных в результате расчетов, предложено продувать металл аргоном через отверстия в подине печи после образования жидкой ванны, расположенные на одной вертикальной оси с электродами. Предлагаемый способ продувки металла аргоном обеспечит снижение температуры в зонах под электродами за счет интенсивного перемешивания расплавленной ванны и присутствие аргона в среде испарения металла, что приведет к снижению интенсивности его испарения.

Физико-химические методы, имеющие высокую точность измерений, позволяют проводить исследования так называемых структурно-чувствительных свойств жидких чистых металлов и сплавов при различных температурах и составах. Наибольшее распространение получили методы измерения плотности, вязкости, поверхностного натяжения, электрической проводимости или электросопротивления, магнитной восприимчивости и т.п.

Физико-химические методы позволяют непосредственно измерять свойства металлических расплавов. Эта информация является весьма ценной, она широко используется в металлургических расчетах, а также для разработки и усовершенствования многих технологических приемов и процессов. Кроме того, результаты физико-химических методов исследования успешно используются для истолкования строения металлических жидкостей. Поскольку из измерения свойств сведения о структуре жидкости

непосредственно не вытекают, то физико-химические методы с точки зрения анализа структуры являются косвенными. Они хорошо дополняют дифракционные методы исследования структуры жидкости. Совместное использование результатов различных методов позволяет более полно и точно характеризовать строение и свойства жидкости.

В данной статье приведены результаты совместной работы Московского государственного вечернего металлургического института (МГВМИ) и Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова по исследованию плотности сплавов системы Fe-Cr-Ni-Si-Mn. Непосредственным объектом исследования плотности сплавов системы Fe-Cr-Ni-Si-Mn являлась сталь 12X18H10T, выплавленная в 12-т ДСП. После выплавки сталь подвергали внепечной обработке на установке ковш-печь с продувкой аргоном. После внепечной обработки на установке ковш-печь сталь разливали на УНРС. Это коррозионно-стойкая сталь, которая достаточно хорошо освоена промышленностью. Сталь используется для изготовления штампуемых деталей, применяемых в агрессивных средах, в газовой среде при высоких температурах.

Однако в жидком состоянии этот сплав изучен не был, поэтому отсутствие знаний в этой области не дает обоснований для термической обработки и подготовки расплава к разливки.

Целью настоящего исследования являлось проведение исследования плотности в широком интервале температур. На базе выявленных закономерностей свойств представлены особенности структурного состояния расплава при различных температурах и на этой основе даны предложения для совершенствования технологии выплавки и внепечной обработки.

Для исследования данного сплава на заводе «Серп и молот» с помощью специально изготовленных пробоотборников были отобраны пробы до начала внепечной обработки (проба № 1) и после (проба № 2). Затем по полученным образцам был проведен анализ на химический состав, а также анализ содержания [O] и [N] (табл. 3).

Таблица 3
Результаты анализа отобранных проб

	[O], % масс.;	[N], % масс.;
Проба №1	0,0240	0,0422
Проба №2	0,0106	0,0433

Основной проблемой при исследовании физико-химических и структурных свойств жидкого металла является повышение точности методов расчета плотности. В настоящей работе была использована новая более точная методика расчета объема и плотности капли, основанная на методе «большой капли» (методика разработана в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова).

На рис. 1 и 2 сопоставлены значения плотности и поверхностного натяжения в зависимости от температуры для проб, отобранных до и после внепечной обработки на установке ковш-печь. Полученные результаты позволяют заключить, что внепечная обработка на установке ковш-печь с длительным нагревом и продувкой аргоном приводит к повышению как плотности, так и поверхностного натяжения. Одновременно происходит уменьшение концентрации кислорода с 0,0224 до 0,0106 %. Концентрация азота изменилась незначительно.

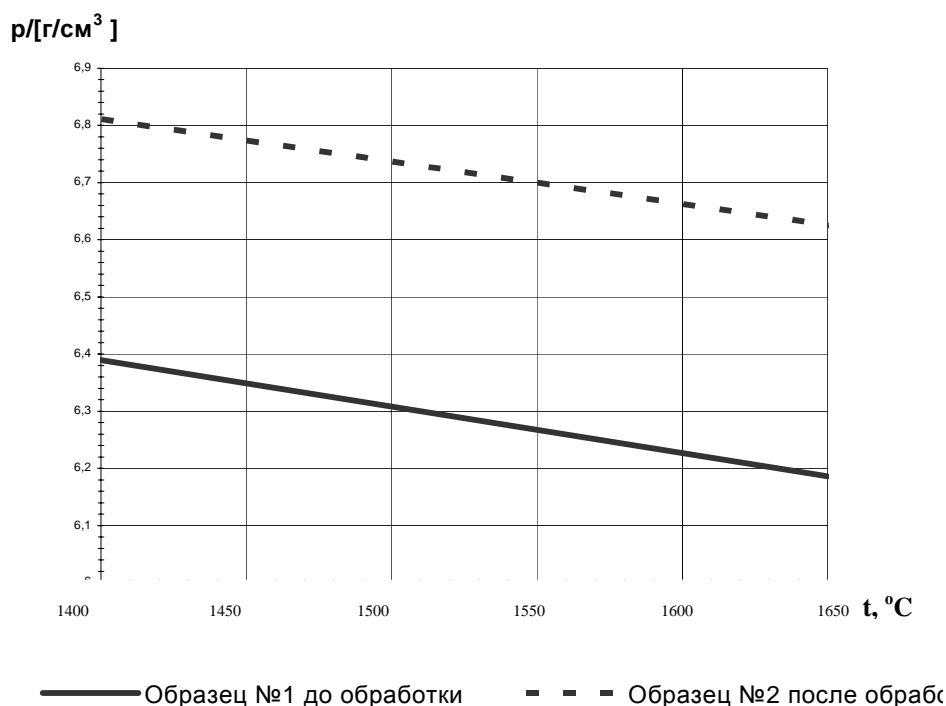


Рис.1. Зависимость плотности стали 12X18H10T от температуры

При анализе полученных результатов будем исходить из квазихимической модели расплавления металла. В соответствии с этой моделью в расплавленной стали после выплавки и выпуска из дуговой печи сохраняется микроструктуры единицы сильно взаимодействующих частиц в виде кластеров на основе углерода в окружении атомов хрома и железа. Внепечная обработка стали с нагревом и продувкой аргоном приводит к частичному или полному разрушению кластеров сильно взаимодействующих частиц. Последние являются поверхностно-активными. В результате разрушения кластеров или уменьшения их концентрации происходит повышение плотности и поверхностного натяжения металлического расплава. Не последнюю роль играет снижение концентрации поверхностно-активного элемента кислорода.

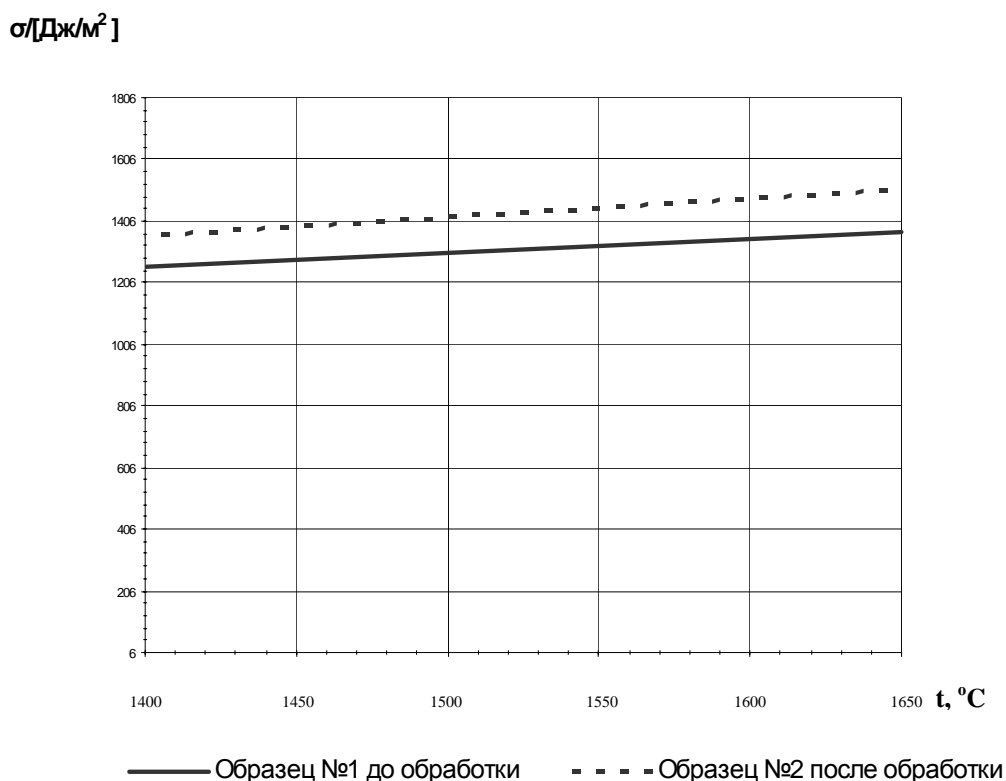


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения стали 12X18H10T от температуры.

Влияние температуры на поверхностное натяжение связано также с разрушениями поверхностно-активных кластеров сильно взаимодействующих частиц. Благоприятную роль в разрушении кластеров играет и повышение температуры металла в процессе нагрева и продувки аргоном.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы, что выпечная обработка коррозионно-стойкой стали на установке ковш-печь приводит к:

- снижению концентрации кислорода;
- повышению плотности металлического расплава во всем интервале температур;
- повышению поверхностного натяжения металлического расплава во всем интервале температур;
- с повышением температуры плотность расплавленной стали понижается, а поверхностное натяжение увеличивается.