

УДК 669.18:669.054.42:519.6

**В.П.Пиптюк^{*}, В.Ф.Поляков^{*}, И.А.Павлюченко^{**}, С.Е.Самохвалов^{**},
А.Ф.Петров^{*}, М.В.Бабенко^{**}, С.Н.Павлов^{*}, Л.А.Игнатенко^{**}**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В ИЗУЧЕНИИ СВОЙСТВ И УСЛОВИЙ ПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ-ДОБАВОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

*Институт черной металлургии НАН Украины^{*},
Днепродзержинский государственный технический университет^{**}*

Целью работы являлось изучение возможности использования физико-химической методологии в изучении свойств ферросплавов, твердых шлакообразующих смесей, их компонентов и рафинировочных шлаковых систем, применяемых на разных этапах сталеплавильного передела. Определена необходимость разработки математических моделей, описывающих плавление (растворение) используемых добавок на границе раздела металлической и шлаковой фаз с учетом траектории их движения, гидродинамики и теплового состояния металлического расплава.

сталеплавильный передел, физико-химия, методология, расплав, ферросплавы, шлакообразующие смеси, плавление, математическая модель

Состояние вопроса и анализ публикаций. Современные технологические схемы выплавки и внепечной обработки стали предусматривают использование разных шлакообразующих, раскисляющих, легирующих, модифицирующих и корректирующих материалов-добавок (далее добавок). Уровень их использования во многом определяет целесообразность и эффективность осуществления тех или иных технологических операций и порядок их реализации. В то же время, прогнозирование условий взаимодействия добавок с жидким металлическим расплавом невозможно без знания их свойств. Поэтому вопросам изучения свойств добавок со стороны металлургов-исследователей всегда уделялось пристальное внимание.

Несмотря на имеющиеся сведения [1–5], данные о свойствах большей части ферросплавов и шлаков остаются еще мало изученными. Существующие экспериментальные методы их определения достаточно трудоемки и ограничены техническими возможностями используемого оборудования и, главное, ввиду химической и структурной неоднородности анализируемых добавок, не всегда позволяют получать адекватные результаты. В то же время, ни одна из известных на сегодняшний день моделей математического описания зависимостей физико-химических свойств от состава не обеспечивает системного перехода от анализа бинарных к более сложным системам. Фактически для каждой из изучаемых систем эмпирическим путем подбирается индивидуальная модель для описания зависимостей основных свойств от концентрации компонентов.

Постановка задачи. Устранение указанных недостатков возможно за счет использования разработанных в ИЧМ НАНУ методологии и критериев для обобщающего описания физико–химических и теплофизических свойств ферросплавов [6]. Методика базируется на определении степени отклонения химического эквивалента состава (ΔZ^y) и структурного параметра (Δd) конкретных составов ферросплавов от вычисляемых для идеальных смесей исходных компонентов Z^y и d . Предлагаемая методология многофакторного физико–химического моделирования базируется на вводе в связь между составом и свойствами многокомпонентных ферросплавных систем промежуточного звена – комплекса интегральных и парциальных параметров, характеризующих химическое и структурное состояние исследуемых систем (ферросплавов).

Исследование связи состав–свойства при таком подходе следует разделять на две части. Первая сводится к выбору для интересующей группы ферросплавов физико–химической модели, адекватно отражающей особенности их электронного строения и специфику свойств. Вторая предусматривает установление корреляций свойств с модельными физико–химическими параметрами и использовании современных математических методов для разработки на базе этих корреляций статистических моделей, позволяющих прогнозировать свойства ферросплавов и результаты их взаимодействия с металлическим расплавом.

Изложение основных материалов исследования.

Результаты проведенных расчетно–теоретических исследований [6,7] свидетельствуют о том, что использование указанной методологии, в случае изучения влияния состава на технологические свойства многокомпонентных смесей (к числу которых могут быть отнесены ферросплавы), вполне оправдано и перспективно как с научной, так и технологической точек зрения. Подтверждена, в частности, возможность использования указанной методологии и оценены основные свойства (плотность, температура и теплота плавления, теплоемкость, теплопроводность и предел прочности) стандартных марок марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов всего производимого в настоящее время в Украине и России сортамента [8,9]. Одновременно высказано предположение о возможности применения указанной модели для прогнозирования свойств других систем ферросплавов, применяемых в массовой металлургии. С применением указанной методологии осуществляется изучение свойств хром–, никель–, титан–, бор–, ванадий– и ниобийсодержащих ферросплавов стандартных марок. Сопоставлением экспериментальных и расчетных значений исследуемых характеристик ферромарганца, ферросиликомарганца, марганца металлического и ферросилиция разных марок установлена удовлетворительная их сходимость и, таким образом, определена приемлемость расчетных результатов для практического использования.

Не менее значимыми в изучении процессов взаимодействия добавок с металлическим расплавом представляются знания свойств твердых шла-

кообразующих смесей (ТШС), их компонентов и сформированных с их участием шлаковых систем на этапах выплавки и внепечной обработки стали. Особенно важным, в этой части, является наличие данных о физико–химических и теплофизических свойствах сталеплавильных (конвертерных, электропечных, мартеновских) и синтетических рафинировочных шлаков. Поэтому здесь, как и в случае с ферросплавами, численную физико–химическую методологию исследования основных свойств различных шлаковых систем сталеплавильного передела, принадлежащую к одному из основных направлений научной деятельности ИЧМ НАНУ [10], следует рассматривать в качестве альтернативы современным экспериментальным методам.

С позиций физико–химической модели [11], трактующей шлаковый расплав любого состава как химически единую систему с учетом температурного фактора, разработаны модели для прогнозирования следующих свойств рафинировочных шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaF}_2$: вязкости, температуры кристаллизации, поверхностного натяжения, плотности, летучести и теплоемкости. Показано определяющее влияние вязкости жидких шлаков на их газопроницаемость.

Разработанная методика прогнозирования теплофизических свойств (теплоты плавления, теплоемкости, теплопроводности) ТШС, применяемых для рафинирования стали, представлена в статье [12]. С помощью такой модели, использующей модельные параметры структуры компонентов шлакообразующих смесей рассчитанные по их составам, получены прогнозные уравнения для оценки свойств ТШС и их компонентов. Приведены, в частности, расчетные характеристики алюмофлюса АК–45. Свойства синтетических рафинировочных шлаков теоретических (CaO-CaF_2 и $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$) и реальных многокомпонентных составов спрогнозированы по разработанной физико–химической методике [13].

В настоящее время в ИЧМ НАНУ продолжается физико–химическое изучение свойств шлаков разных способов выплавки и внепечной обработки стали, проводятся анализ и сопоставление соответствующих расчетных результатов с выявленными экспериментальными данными, осуществляется целенаправленная деятельность по созданию расчетно–экспериментальной базы данных по составам и свойствам широкого спектра шлаковых систем сталеплавильного передела. Результаты физико–химического прогнозирования основных свойств стандартных марганец– и кремнийсодержащих марок ферросплавов, а также ТШС, их компонентов и рафинировочных шлаковых систем использованы в качестве исходных данных при математическом моделировании процессов внепечной обработки стали для оценки эффективности их применения и разработки технологических рекомендаций по ресурсо–, энергосбережению.

Как отмечалось выше, процессы производства стали предусматривают использование различных добавок, ввод которых осуществляется на разных этапах сталеплавильного передела: в плавильный агрегат, в запол-

няемый сталеразливочный ковш при выпуске плавки, в наполненный сталеразливочный ковш при продувке металла аргоном (азотом), во время обработки полупродукта на установке доводки металла (УДМ) или установке ковш–печь (УКП), при вакуумировании металла, в промежуточный ковш или изложницу по ходу разливки стали. При этом добавки применяют, главным образом, в кусковом и порошкообразном виде, а также в форме порошковой проволоки или проволоки сплошного сечения (алюминий).

Правильный выбор вида, формы добавки, технологических условий и режимов ее ввода в железоуглеродистый расплав во многом определяет эффективность использования добавки, а знание продолжительности этапов плавления (растворения) и усвоения последней металлической ванны позволяет выявлять рациональные ресурсосберегающие схемы раскисления, легирования, микролегирования, модифицирования, рафинирования и доводки металла по химическому составу.

Значительный вклад в развитие теоретических и технологических основ процессов плавления (растворения) разных добавок при производстве стали на рубеже XX–XXI веков, наряду с зарубежными учеными [14–26], внесли металлурги–исследователи постсоветского пространства [27–39]. В этот период, наряду с широко используемыми экспериментальными, физическими и физико–химическими методами исследования указанных процессов, находит применение метод математического их представления. Распространение численных методов в познании металлургических процессов объясняется целым рядом причин, в числе которых возможность изучения высокотемпературных и агрессивных сред без значительных материальных затрат, гибкость и оперативность учета влияния переменных факторов в выявлении закономерностей и особенностей при их протекании и др. Так в статье [27] сообщается об усовершенствовании разработанной авторами математической модели плавления легкоплавких кусковых ферросплавов в металлической ванне ковша. На основе совместного решения уравнения Фурье в квазистационарном состоянии и уравнения движения куска сферической формы рассмотрен процесс усвоения железоуглеродистым расплавом продуктов плавления ферросплавов. Модель учитывает взаимосвязь тепло–, массообменных процессов между расплавом и добавкой.

Авторы монографии [28] с использованием математических моделей и результатов исследований гидродинамики металлического расплава других авторов, фундаментальных представлений о рассмотренных процессах; собственных расчетных данных о тепловом эффекте взаимодействия добавок с расплавом, уровня усвоения элементов плавления и ряда дополнений осуществили численное исследование продолжительности плавления (растворения) твердых микродобавок и алюминия для условий их ввода на выпуске плавки из конвертера и мартеновской печи, при обработке расплава на УДМ и в процессе разливки в изложницы. Установ-

лено, что продолжительность плавления твердых кусковых микродобавок увеличивается при повышении степени раскисленности стали, а при усвоении продолжительность существования твердой микродобавки в жидком металле в режиме ее растворения значительно больше, чем при плавлении.

Условием минимизации механических потерь микродобавок является обеспечение их пребывания в жидкой стали от момента ввода до конца плавления (растворения). Это достигается при организации ввода добавок под струю металла (на выпуск плавки) или в околофурменную зону (при обработке на УДМ аргоном через погружаемую фурму). Определены критические размеры кусковых добавок сферической формы разного состава для указанных технологических этапов их ввода с учетом намерзания оболочки расплава.

В монографии [29] в физической постановке рассмотрены процессы плавления и растворения кусковой добавки полностью погруженной в металлический расплав. Приведены разработанные авторами одно- и двумерные математические модели и алгоритмы расчета плавления тугоплавкой, легкоплавкой и диффузионного плавления (растворения) сверхтугоплавкой добавки в железоуглеродистом расплаве. Учитываются образование и последующие оплавление оболочки и распределение дополнительно введенного суммарного теплового эффекта от растворения и окисления элементов с определенными для естественной и вынужденной конвекции коэффициентами теплоотдачи и массопереноса.

Приведены результаты исследований ввода добавок феррованадия ФВд35, ферросиликоциркония ФСЦр50 и вторичного алюминия АВ-87 в заполняемый сталеразливочный ковш при заданных скоростях (0 и 15 м/с) обтекания расплавом низкоуглеродистой (09Г2С, 09Г2, 08кп), малоуглеродистой (15Г2АФДпс, 20Г2АФпс) и высокоуглеродистой (У10) стали с температурой металла от 1550 до 1650⁰С. Там же сообщается о разработке математической модели формирования рафинировочного шлака из ТШС в процессе выпуска плавки.

Авторы приводят методику определения рациональных параметров технологии обработки стали кусковыми добавками в процессе выпуска плавки из конвертера в сталеразливочный ковш и при сифонной разливке в изложницы, основанную на использовании конечно-разностных методов двумерной задачи гидродинамики, совместной задачи двумерного движения и плавления добавок с учетом полей скоростей расплава, а также задачи массообмена (усреднения жидкой фазы добавки в металле). Использовано уравнение Навье–Стокса с применением метода Н.И.Никитенко. Приведены поля скоростей при наполнении и в заполненном ковше (250 т), методика расчета траектории движения кусковой добавки при вводе в заполняемый ковш. Установлено, что увеличение фракции кусков и повышение уровня заполнения ковша увеличивает длительность усреднения добавки. Определены эффективные режимы ввода

алюминиевых гранул и ферротитана на выпуске плавки и отмечены условия, при которых рассмотренные добавки не успевают полностью расплавиться в металле, а завершение этого процесса должно происходить на поверхности ванны.

Исследовано плавление крупногабаритного алюминиевого слитка и кусковых (сфера) добавок ферротитана, ферросилиция, ферромарганца, феррованадия, феррониобия и алюминия в виде чушек в наполненном 350т ковше. Для алюминиевого слитка использована одномерная, а для остальных исследованных добавок – двумерная математические модели плавления (растворения) и усреднения в малоуглеродистой стали с температурой 1600°C , учитывающая гидродинамику и гомогенизацию расплава при его продувке аргоном через погружаемую фурму с расходом $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определено, что рациональной для усвоения кусковых добавок является околофурменная зона при обработке на УДМ. Процесс плавления (растворения) добавки менее длителен, чем усреднения и, в отличие от последнего, более зависим от размера куска. Плотность добавки и место ее плавления (растворения), в значительной мере, определяют продолжительность усреднения расплавленного куска металлом. Как и при вводе на выпуске плавки, в случае присадки в ковш на УДМ, алюминия, ферротитана и ферросилиция отмечен их вынос на поверхность металла, где они расплавляются и усредняются на границе «шлак–металл».

Авторами предпринята также попытка численной оценки продолжительности плавления алюминиевой чушки на границе «шлак–металл» в ковше на УДМ и проволоочно–порошковых (алюминиевая проволока, порошковая проволока с силикокальцием и лигатурой РЗМ) при вводе в ванну УДМ с фиксированными значениями скоростей обтекания ($0; 0,2\text{--}1 \text{ м/с}$). Математическое описание и количественное решение сопряженных осесимметричных задач гидродинамики расплава в ходе продувки плавки в конвертере, плавления (растворения) легирующих добавок ферроникеля и молибденсодержащей лигатуры и усреднения их жидкой фазой в объеме ванны приведено авторами [30]. На основе результатов расчета и экспериментов разработаны предложения по рациональному гранулометрическому составу и режимам ввода добавок в конвертерную ванну.

Сообщается об определении закономерностей ресурсосберегающих внепечных технологий доводки, микролегирования, рафинирования и модифицирования стали малоуглеродистого и низколегированного сортамента в ковшах емкостью 350 т и 250 т при выпуске плавки из конвертера и при аргонной обработке на УДМ [31]. Технологически необходимые размеры кусковых добавок оценены, в т.ч. методом математического моделирования процессов их плавления (растворения), гидродинамики металла, движения куска в расплаве и гомогенизации ванны. Учитываемый при численном исследовании расчетный тепловой эффект от взаимодействия освободившегося от намерзшей оболочки куска и расплава спокой-

ной стали определен с учетом образования высококонцентрированных зон в пограничном слое.

В отличие от ранее приведенных данных [29] и с учетом проведенных расчетных уточнений сообщается о рациональном месте ввода добавок на УДМ у борта ковша, где отмечаются наиболее активные нисходящие потоки расплава, вовлекающие куски вглубь ванны. Показана возможность плавления и усреднения на поверхности ванны кусковых добавок алюминия, ферротитана и ферросилиция. В то же время определено, что добавки ферромарганца и феррованадия в кусках диаметром до 50 мм, введенные у борта ковша на УДМ, полностью плавятся и усредняются в объеме металла.

В статье [32] представлена методика математического моделирования температурного состояния теплофизической системы частица–расплав с фазовыми переходами типа плавление–затвердевание. Изучены условия внутреннего теплообмена в зоне перемешивания стальной дробы с жидким металлом и в зоне спокойного металла. Рассмотрены процессы плавления твердых частиц и кристаллизации расплава. Приведены температурные поля вышеуказанной системы на разных стадиях процессов с учетом намораживания гарнисажа на поверхности дробинки в жидкой низко– и среднеуглеродистой стали.

Кратко описана математическая модель и метод определения длительности плавления кремнистых (ФС25, ФС45 и ФС75) ферросплавов в железоуглеродистом расплаве [33]. Адекватность расчетных данных проверена на водяной модели. Продолжительность плавления указанных ферросплавов изучена в статических условиях. Высказано мнение о том, что тепловой эффект от окисления значительно влияет на длительность расплавления стальной корочки и куска ферросплава. Одновременно авторы считают, что ввиду незначительной продолжительности этого периода (около 3,6% от общего времени плавления) вышеуказанным влиянием можно пренебречь.

Методом математического моделирования изучен процесс усвоения кусковых микродобавок ферробора (ФБ6 и ФБ20) и ферротитана (ФТи30) в стали ЗТРпс в заполняемом ковше с одновременной несимметричной продувкой аргоном с учетом захвата воздуха струей металла при выпуске плавки из конвертера [34].

Отличием использованного метода в моделировании плавления (растворения) добавок от ранее приведенных [29,31,33] являлся учет места их ввода на зеркало металла не только относительно зоны истечения струи, но и несимметричного расположения продувочной фурмы в днище ковша. Установлены закономерности процессов плавления (растворения) и усреднения добавок в рассматриваемых условиях и их продолжительность. Определены рациональные зоны ввода добавок и гранулометрический состав. Показано, что при определенных режимах ввода добавок их плавление (растворение) будет происходить на границе «шлак–металл».

Продолжительность усвоения кусковых ферромарганца, ферросилиция и феррохрома при вводе в ковш в процессе выпуска плавки и в процессе доводки на УДМ и допустимые пределы легирования стали определены расчетом с помощью аналитической модели [35]. Предсказаны разные условия взаимодействия марганец- и кремнийсодержащих ферросплавов со шлакометаллическим расплавом, в т. ч. в поверхностной части ванны ковша. Сообщается об исследовании процесса растворения углеродсодержащего порошкообразного материала при вводе в наполняемый ковш в процессе выпуска плавки с использованием клеточно-автоматических методов моделирования [36]. Рассмотрены результаты расчета времени плавления силикокальция СК30 при вводе кусками, вдуванием порошка и порошковой проволокой [37].

Для изучения кинетики плавления никельсодержащих ферросплавов в железоуглеродистом расплаве использована математическая модель, состоящая из гидродинамической и тепловой частей [38]. Теоретическая оценка продолжительности плавления ферроалюминия разного химического и фракционного состава в металлическом расплаве представлена в статье [39]. Анализ представленной выше информации свидетельствует о наличии к настоящему моменту математических и аналитических моделей, позволяющих осуществлять расчет продолжительности процессов плавления (растворения) и усвоения жидкого продукта из твердых кусковых добавок железоуглеродистым расплавом для условий их протекания в объеме металла. Численное описание указанных процессов реализуется, главным образом, в одно- и двумерном представлении граничных условий и расчетной области. Расчетами учитываются гидродинамическое и тепловое состояние металлической ванны конвертера, сталеразливочного ковша и изложницы. При этом для ковшевой ванны рассмотрены следующие варианты: при наполнении (на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата), в т.ч. с одновременной продувкой аргоном через асимметрично расположенную донную фурму; в заполненном ковше при доводке металла на УДМ с продувкой аргоном через погружную осесимметричную фурму и в заполненном ковше после выпуска плавки из конвертера (принудительное погружение в ванну крупногабаритного алюминиевого слитка), в т. ч. с продувкой аргоном через канал в погружной штанге.

В то же время не выявлены модели, которые позволяют оценивать продолжительность плавления (растворения) и усвоения кусковых добавок расплавом в условиях обработки на УДМ и при вакуумировании. Отсутствуют также математические модели, прогнозирующие плавление (растворение) и усвоение кусковых добавок на границе раздела фаз «шлак-металл». В [29,37,40] сообщается о разработке и результатах использования математических моделей плавления и усвоения элементов стали из проволочных (порошковых и алюминиевой проволоки) добавок. Модели базируются на системе нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающих передачу тепла в проволоке, пред-

ставленной в виде системы бесконечных цилиндров. Учтены образование и оплавление стальной оболочки, тепловые эффекты плавления, кристаллизации и химического взаимодействия внутри проволоки с помощью квазиравновесной теории двухфазной зоны для бинарных сплавов. При этом траектория движения проволоки в объеме ванны и гидродинамическое состояние последней не рассматривались.

Результаты математического моделирования динамики плавления проволоки с силикокальцием представлены в [41, 42]. Высказывается предположение о влиянии экзо- и эндотермических реакций образования химических соединений (Fe_2Si , CaN_2) и испарения реагентов на основе Ca и Mg, а также температурного (для Fe–C расплава) и скоростного (для ввода проволоки) факторов на динамику плавления наполнителя проволоки и намерзания и оплавления стальной корочки.

Использование разработанных математических моделей для изучения процессов плавления проволок с силикокальцием и сплошного сечения (алюминий) в процессе внепечной обработки стали на УДМ предложено в работах [43–45]. Модели тепловых процессов учитывают диаметр, толщину оболочки и скорость ввода проволоки в расплав. В работе [45] учитывается барботажное перемешивание ванны всплывающими пузырьками паров кальция.

В отличие от публикаций [43,45] авторами [44] в трехмерной постановке учитывается траектория движения проволоки и оценивается продолжительность усреднения расплавленной жидкой добавки в объеме ковша при донной и верхней аргонной продувке металла с намерзанием слоя шлака на поверхность проволоки и металлической оболочки поверх слоя шлака с их последующим плавлением. Однако, ввиду недостаточного корректного представления модели и отсутствия учета таких важных факторов, как изменение объема пузырьков аргона в ковше с металлом и относительная скорость их движения при продувке расплава [46], существенно влияющих на гидродинамику ванны, приведенные результаты следует рассматривать в качестве предварительных.

Разработана математическая модель для исследования кинетики плавления проволочных добавок в сталеразливочном и промежуточном ковшах и изучено влияние изменения теплофизических характеристик наполнителя порошковой проволоки в зависимости от его пористости [47]. Кроме указанного в модели [48] учитывается возможность растворения оболочки в расплаве наполнителя, а также процессы массообмена капель наполнителя с жидкой сталью. Предложен критерий, определяющий рациональную скорость ввода проволоки в зависимости от температуры металла и угла ее ввода. Для ковша емкостью 350 т определены рациональные пределы скорости ввода проволоки, обеспечивающие максимальную степень использования кальция.

В сообщении [49] приводятся результаты математического моделирования плавления проволок с использованием новых или уточненных дан-

ных о теплофизических свойствах порошковых наполнителей и компактных материалов–добавок. Обобщая результаты исследований авторы сообщают об отсутствии влияния скорости ввода и температуры расплава на продолжительность плавления проволок с силикокальцием и графитом. Предложена дифференциация скорости ввода таких добавок с разными наполнителями.

По мнению авторов статьи [50] оптимальными условиями применения порошковой проволоки является обеспечение ее ввода, когда расплавление оболочки и освобождение наполнителя происходит у дна ковшевой ванны. Влияние переменных параметров на плавление проволоки в железоуглеродистом расплаве изучалось методом математического моделирования. В числе наиболее важных факторов, оказывающих влияние на глубину погружения проволоки, авторы указывают в частности, скорость ее ввода и температуру расплава. Не приводя описания модели и не сообщая используемых в расчетах данных, авторы резюмируют, что замороженная (настыль) оболочка практически не будет образовываться при вводе проволоки (1–3 м/с) в сталь через слой синтетического шлака толщиной 100–200 мм. Уменьшение толщины стальной оболочки проволоки при вводе через шлак толщиной 200 мм снижает влияние скорости ее ввода на глубину погружения до расплавления (L) в металле и при толщине стальной оболочки 0,2 мм становится малозначимым. Показано, что при постоянной скорости ввода проволоки влияние ее диаметра (13 и 30 мм) на величину L в диапазоне исследованных толщин стальной оболочки (0,2–0,6 мм) при вводе через шлак толщиной 100–200 мм практически несущественно. Рассматривается перспективность применения проволоки больших (≥ 14 мм) диаметров для высокого науглероживания, микролегирования и легирования стали.

Анализ приведенных данных свидетельствует об имеющихся противоречиях в определении значимости переменных факторов на процесс плавления проволоки. Не выявлено наличия комплексных математических моделей, учитывающих влияние существенных факторов (увеличение объема и относительной скорости движения пузырьков аргона в металлическом расплаве) на гидродинамическое и тепловое состояние ковшевой ванны при вводе проволоки и одновременно позволяющих определять продолжительность ее плавления (растворения) и усвоения расплавом.

Выводы. Показана возможность и перспективность применения физико–химической методологии в оценке основных свойств ферросплавов, компонентов ТШС и применяемых в сталеплавильном производстве рафинировочных шлаков.

Определена необходимость разработки математических моделей, рассматривающих процессы плавления (растворения) и усвоения расплавом кусковых добавок на границе «шлак–металл» на разных стадиях внепечной обработки, в т. ч. на УКП и при вакуумировании металла.

Установлена целесообразность создания комплексных математических моделей, описывающих процессы плавления (растворения) порошковых и сплошного сечения проволок, при вводе в наполненный сталеразливочный ковш с учетом влияния существенных факторов на гидродинамику и тепловое состояние ванны.

1. *Игнатъев В.С., Гальперин В.В.* Определение удельного сопротивления промышленных ферросплавов // *Металлургия и коксохимия. Электрометаллургия.* – К.: Техніка, 1978. – Вып. 56. – С. 49–51.
2. *Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В.С.Игнатъев, В.А.Вихлевщук, В.М.Черногрицкий и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 1988. – №6. – С.37–42.
3. *Ефименко С.П., Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н.* Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
4. *Физико–химические характеристики марганцевых ферросплавов / В.И. Жучков, А.Л. Завьялов, А.С. Носков и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 1994. – №10. – С. 9–10.
5. *Охотский В.Б.* Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 284 с.
6. *Приходько Э.В., Петров А.Ф.* Методика прогнозирования физических и теплофизических свойств марганцевых ферросплавов в зависимости от состава // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2008. – №6. – С.27–30.
7. *Физико–химическая оценка свойств промышленных ферросплавов / В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2007. – Вып. 14. – С.235–243.*
8. *Пиптюк В.П., Петров А.Ф., Греков С.В.* Прогнозирование свойств промышленных марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов // *Тр. XII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов».* – Т. 2. Экспериментальное изучение жидких и аморфных металлических систем и их взаимосвязь с кристаллическим состоянием: Екатеринбург, УО РАН, 2008. – С.17–19.
9. *Прогнозирование свойств стандартных марганец– и кремнийсодержащих ферросплавов / В.П.Пиптюк, А.Ф.Петров, С.В.Греков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2008. – Вып. 17. – С.218–230.*
10. *Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н.* Физико–химическое моделирование – теоретическая основа информационных технологий в металлургии // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2004. – Вып. 8. – С.327–334.*
11. *Прогнозирование свойств рафинировочных шлаков системы CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO–CaF₂ / А.Ф.Хамхотъко, Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2004. – Вып. 9. – С.168–175.*
12. *Прогнозирование теплофизических свойств твердых шлакообразующих смесей и их компонентов для рафинирования стали / Э.В.Приходько, В.П.Пиптюк, А.Ф.Хамхотъко и др. // Фундаментальные и прикладные про-*

- блемы черной металлургии. Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2006. – Вып. 13. – С.196–203.
13. *Комплексная физико–химическая оценка свойств компонентов ТШС и синтетических рафинирующих шлаков* / Э.В.Приходько, В.П.Пиптюк, А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн.тр. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2007. – Вып.15. – С.179–189.
 14. *Эман Б., Ленер Т.* Ковшовое рафинирование стали. // *Инжекционная металлургия*. Лулеа, Швеция. 1977. Пер с англ. М.: Металлургия, 1981. – С.9–21.
 15. *Ленер Т.* Моделирование процесса вдувания порошка. // *Инжекционная металлургия*. Лулеа, Швеция. 1977. Пер с англ. М.: Металлургия, 1981. – С.94–118.
 16. *Гутри Р.И.Л.* Физико–химические и гидродинамические аспекты легирования расплава методом вдувания порошков. // *Инжекционная металлургия* 80. Лулеа, Швеция. 1980. Пер с англ. М.: Металлургия, 1982. – С.75–92.
 17. *Плюшкель В., Реденс В., Шюрман Э.* Кинетика окисления алюминия при продувке жидкой стали. // Там же. – С.116–128.
 18. *Абратис Х., Лангхамлер Х.–Дж.* Вдувание в металл порошкообразных легирующих материалов. // Там же. – С.266–276.
 19. *Асаи Ш., Кавачи М., Мучи И.* Скорость массопереноса в процессах ковшового рафинирования. // *Инжекционная металлургия* '83. Тр.конф. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1986. – С.106–124.
 20. *Новое применение проволоки с сердечником в непрерывной разливке* / В. Карузо, А. Коперчими, А. Джакони и др. // Там же. – С. 190–202.
 21. *Ототани Э.Т.* Новейшие достижения в производстве стали с использованием проволоки из металлического кальция. // Там же. – С. 327–336.
 22. *Робисон Дж.В.* Обработка в ковше введением проволоки из металлического кальция, плакированного сталью. // Там же. – С.365–378.
 23. *Гутри Р.И.Л.* Практика вдувания в металл легирующих добавок и их перемешивание. // Там же. – С.283–298.
 24. *Аргиропулос С.А.* Роль экзотермичности при ассимиляции твердых частиц жидкими металлами. *Инжекционная металлургия*'86. Тр. конф. Пер. с англ. М.: Металлургия. – 1990. – С.348–354.
 25. *Обработка в ковше раскисленной алюминием стали AISI 1018 кальциевой проволокой, армированной стальной оболочкой* / С.Л. Чоу, Ф.С. Шир, П.С. Янг и др. // Там же. – С.363–372.
 26. *A single particle penetration into liquid as a basis of powder injection* / Lee Jueng–Gil, Ito Kimisha, Toyoda Shoichi et al. // *Proc 6th Int. Iron and Steel Congr., Nagoya*, Oct. 21–26, 1990, Tokyo. – 1990. – Vol.1. – P.437–443.
 27. *Математическая модель плавления куска ферросплава при циркуляционном движении жидкого металла в ковше* / А.С.Носков, А.В.Некрасов, В.И.Жучков и др. // *Расплавы*. – 1990. – №5. – С.113–120.
 28. *Научные и технологические основы микролегирования стали* / В.Л.Пилюшенко, В.А.Вихлевщук, С.В.Лепорский и др. М.: Металлургия, 1994. – 384 с.
 29. *Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали* / В.А.Вихлевщук, А.П.Огурцов. И.А.Павлюченков и др. Киев: ИСМО МО Украины, 1997. – 151 с.

30. *Вихлевицук В.А., Кекух А.В., Семенов С.Е.* Ресурсосберегающая технология выплавки легированных сталей для сварочной проволоки: – Днепродзержинск: ДГТУ, 1999. – 117 с.
31. *Вихлевицук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С.* Ковшевая доводка стали: – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
32. *Соколовская Л.А., Осипов В.П., Малышев В.А.* Использование математического моделирования при исследовании теплофизических процессов взаимодействия расплава с твердыми добавками // Процессы литья. – 2000. – №4. – С.72–78.
33. *Изучение влияния технологических факторов на время плавления кремнистых ферросплавов в жидком металле / Е.Ю.Лозовая, А.В.Некрасов, В.И.Жучков и др. // Расплавы. –2001.–№3.–С.10–17.*
34. *Научные и технологические основы производства арматурных сталей нового поколения / В.А.Вихлевицук, О.В.Дубина, В.А.Поляков и др. К.: Наукова думка, 2001.–159с.*
35. *Охотский В.Б.* Растворение ферросплавов при ковшевом легировании стали // Процессы литья. – 2003.–№2.–С.3–6.
36. *Математическое моделирование процесса растворения углерода при перемешивании расплава и порошковых материалов / А.Н.Чичко, Н.В.Андрюханов, В.Ф.Соболев и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2005.–№12. – С.38–41.*
37. *Оценка времени плавления силикокальция при вводе в жидкую сталь различными способами / Е.Ю.Лозовая, С.П.Бурмасов, О.Ю.Шешуков и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006.–№7.–С.185–187.*
38. *Закин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю.* Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. –№5.–С.13–16.
39. *Лозовая Е.Ю., Жучков В.И., Шешуков О.Ю.* Определение продолжительности плавления ферросплавов системы Fe–Al в железоуглеродистом расплаве // Электрометаллургия. – 2007.–№1.– С.13–15.
40. *Никулин А.Ю., Девятков Д.Х., Алфимова Н.А.* Математическая модель процесса растворения порошковой проволоки в жидкой стали при внепечной обработке в ковше // Тр. междуна. конф. «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке». Москва 6–10 июня 1994 г. – М.: Черметинформация, 1994. – Т.3. – С.65–69.
41. *Никулин А.Ю., Логийко Г.П.* Взаимодействие кальцийсодержащей порошковой проволоки с жидким металлом при внепечной обработке стали // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1996. – №11. – С.4–9.
42. *Влияние гидродинамических и теплофизических процессов на параметры обработки металлических расплавов порошковыми проволоками / Д.А.Дюдкин, В.П.Онищук, Ю.И.Бать и др. // Тр. IV конгр. сталеплавильщиков. Москва 2–10 октября 1996 г. – М.: Черметинформация, 1997. – С. 284–285.*
43. *Определение оптимальной скорости ввода порошковой проволоки с силикокальциевым наполнителем в ковш с жидкой сталью / С.А.Крупенников, Ю.П.Филимонов, А.Г.Кузьменко и др. // Электрометаллургия. – 2000. – №11. – С. 15–22.*
44. *Вихлевицук В.А., Болотов В.Ю., Павлюченков И.А.* Численное моделирование процесса усвоения добавок порошковых проволок и пруткового алюминия

- при внепечной обработке стали // Тр. VI конгр. сталеплавильщиков. Череповец 17–19 октября 2000 г. – М.: Черметинформация, 2001. – С.375–379.
45. *Барботажное* перемешивание и механизм усвоения кальция при обработке стали в ковше порошковой проволокой / Е.А.Чичкарев, А.И.Троцан, Е.А.Казачков и др. // Вісник ПДТУ, 2002. – №12. – С.34–38.
 46. *Влияние* постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш–печь. Часть 2. Модель массопереноса / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А.Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – №4–5. – С.14–17.
 47. *Кинетика* плавления порошковой проволоки с легкоплавкими химически активными наполнителями в жидкой стали / Л.А.Позняк, А.И.Троцан, И.Л.Бродецкий и др. // Процессы литья. – 2002. – №2. – С.74–79.
 48. *Рациональный* режим обработки жидкой стали порошковой проволокой с легкоплавкими химически активными наполнителями / С.Г.Рудакова, Е.А.Чичкарев, А.И.Троцан и др. // Процессы литья. – 2003. – №2. – С.35–41.
 49. *Моделирование* плавления и разработка параметров ввода порошковых проволок на основе алюминия кальция и углерода / А.А.Карпов, С.П.Бурмасов, В.И.Жучков // Тр. VI конгр. сталеплавильщиков. Нижний Тагил 18–22 октября 2004 г. – М.: Черметинформация, 2005. – С.354–356.
 50. Кузьменко А.Г., Мазуров Е.Ф., Крупенников С.А. Основные технологические и конструктивные параметры порошковой проволоки универсального применения // Электрометаллургия. – 2008. – №5. – С.12 – 17.

*Статья рекомендована к печати:
Зам.ответственного редактора
раздела «Сталеплавильное производство»
докт.техн.наук, проф. Э.В.Приходько*

***В.П.Піптюк, В.Ф.Поляков, І.О.Павлюченков, С.Е.Самохвалов,
А.Ф.Петров, М.В.Бабенко, С.М.Павлов, Л.О.Ігнатенко***

Використання чисельних методів у вивченні властивостей і умов плавлення матеріалів-домішок при виробництві сталі.

Метою роботи є вивчення можливості використання фізико-хімічної методології у вивченні властивостей феросплавів, твердих шлакоутворюючих сумішей, їх компонентів і рафінувальних шлакових систем, що використовуються на різних етапах сталеплавильного переділу. Визначено необхідність розробки математичних моделей, що описують плавлення (розчинення) добавок на межі розділу металевої і шлакової фаз з урахуванням траєкторії їх руху, гідродинаміки і теплового стану металевого розплаву.