

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Н.А. Захаров (НПП «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ»)

*Рассмотрено физическое моделирование ряда технологических процессов – производства стали в кислородном конвертере, плавки в электродуговой печи, термообработки, газоотведения. Для кислородного конвертера исследовано разбрызгивание расплава при продувке кислородом. Для электродуговой печи промоделировано перемешивание токонесущего расплава под действием внешнего магнитного поля. Моделирование термообработки позволило отработать режим нагрева. На модели газоотсоса исследованы механические усилия в песочных затворах и проверена полнота удаления дыма от дуговой печи малой емкости.*

*Ключевые слова:* физическая модель, кислородный конвертер, электродуговая печь, термообработка, газоотсос.

Технологические процессы в металлургии характеризуются существенной неопределенностью структуры и параметров внешних и внутренних возмущений, а также сложным характером зависимости между входными/выходными переменными, наличием внутренних перекрестных связей. Применение к ним математического моделирования ограничивается сложностью построения пригодных для идентификации математических моделей. Поэтому в ряде случаев целесообразно применение физических моделей технологических процессов.

Физическое моделирование — это один из методов научных исследований, предполагающий замену изучения интересующего объекта или протекающего в нем технологического процесса на проведение экспериментов на физической модели. Физическая модель характеризуется тем, что основные процессы, протекающие в ней и в исследуемом с ее помощью объекте, имеют одинаковую физическую природу, хотя и не тождественны. В настоящее время физическое моделирование широко применяется для процессов, протекающих в сложных геометрических системах, а также для решения задач, связанных с движением жидкостей и газов. Одним из основных преимуществ физического моделирования является возможность осуществления прямых наблюдений за моделируемыми процессами и явлениями, в ряде случаев это преимущество оказывается решающим.

Физическое моделирование бывает двух видов: с увеличением и с уменьшением масштаба системы. В металлургии, как и в большинстве отраслей промышленности, по очевидным причинам применяют моделирование с уменьшением масштаба.

Теоретической основой физического моделирования является теория подобия, позволяющая пересчитывать количественные характеристики, полученные при изучении модели, в количественные характеристики оригинала. Проиллюстрируем сказанное на примере технологических процессов в черной металлургии.

### Кислородный конвертер

Согласно статистике, наибольшее количество стали (более 70%) в мире выплавляют, используя кислородный конвертер. Основным и решающим фактором продувки в кислородных конвертерах является взаимодействие высокоскоростной струи кислорода с расплавленной ванной. Для получения дополнительных знаний

о гидродинамике конвертерной ванны и особенностях разбрызгивания жидкой среды при ЛД-процессе<sup>1</sup> в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Украина, г. Днепр) были выполнены исследования на физической модели 160-т конвертера, изготовленной в масштабе 1:30 [1].

Расплавленная сталь имитировалась водным раствором хлорида натрия. Продувка осуществлялась нейтральным газом через верхнюю пятилопастную фурму. Модель состояла из трех участков. Зона «А» — вблизи фурмы (имитация движения жидкости в подфурменной зоне и набрызгивания расплава на фурму). Зона «Б» — в направлении стенки модели (имитация набрызгивания на стенку и горловину). Зона «В» вынос жидкости за пределы модели. Оценка интенсивности образования брызг проводилась путем сбора жидкости в вертикально расположенные пробоотборники в течение 1 мин. Пробоотборники затем взвешивали на электронных весах. Оценка потерь в результате выноса за пределы модели жидкости (зона «В») выполнялась путем взвешивания модели с жидкостью до и после продувки, при этом учитывалась масса жидкости в пробоотборниках.

Продувка осуществлялась при различных положениях фурмы и значениях давления газа. Исследовалось влияние подведенного к фурме электрического потенциала — рассматривались три варианта: без воздействия, подведение к фурме отрицательного полюса источника напряжения и подведение положительного полюса. В ходе экспериментов дутьевой режим продувки поддерживался неизменным.

Исследования на модели показали, что интенсивность разбрызгивания и связанное с этим наполнение каплями отдельных пробников по горизонтам изменяется по экспоненциальной зависимости, снижаясь в десятки раз при переходе к верхним уровням.

Выполненное физическое моделирование ЛД-процесса позволило выявить характерные особенности образования брызг в рабочем объеме модели и оценить число брызг, выносимых за пределы модели, что на практике соответствует интенсивности формирования гарнисажа на горловине конвертера и элементах охладителя конвертерных газов. Установлено, что зависимость характеризующего потери сырья числа брызг выносимой за пределы модели жидкости от уровня расположения фурмы над жидкостью носит экстремальный

<sup>1</sup> Linz Donawitz (LD) процесс — способ производства стали в кислородном конвертере продувкой жидкого чугуна техническим кислородом сверху через водоохлаждаемую фурму.

характер с заметным снижением при нулевой высоте, а также выше определенных значений.

Исследования на физической модели показали, что, независимо от полярности потенциала фурмы относительно жидкости, интенсивность разбрызгивания жидкости снижается. Выявлено, что применение отрицательной полярности в большей степени оказывает влияние на интенсивность разбрызгивания в прифурменной и в пристеночной зонах, а применение положительной полярности снижает вынос брызг за пределы модели. Выполненные на физической модели эксперименты при продувке солевых водных растворов газами с использованием электрических потенциалов показали возможность расширения области применения разрабатываемого метода на процессы, несвязанные с металлургией.

#### Электродуговая печь

Объемные электромагнитные силы, вызванные воздействием внешнего магнитного поля на находящийся в ванне дуговой печи постоянного тока (ДППТ) токонесущий расплав, приводят его в движение. Такое воздействие на металл и шлак приводит к кондукционному перемешиванию, повышающему интенсивность протекания тепломассобменных процессов, а также влечет за собой возникновение интенсивных течений, вымывающих футеровку печи, сильное отклонение дуги от вертикали или движение ее по поверхности расплава [2].

Практическому применению кондуктивного перемешивания металла в ДППТ препятствует отсутствие энергоэффективных управляемых источников внешних магнитных полей, а также недостаточная изученность характера течений в ванне ДППТ под действием магнитного поля заданной напряженности и конфигурации.

Теоретическое и экспериментальное изучение течения токонесущего расплава в условиях воздействия собственного и внешнего магнитных полей связано со значительными, а во многих случаях непреодолимыми сложностями. В частности, непрозрачность металлов делает невозможным изучение общего характера магнитогидродинамических течений. Использование вместо расплавов металлов прозрачных токопроводящих жидкостей обладает очевидными преимуществами в плане наблюдений. Но их низкая электропроводность не позволяет реализовать в физической модели плотность тока, равную плотности тока в печи.

В Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова разработана физическая модель ДППТ с использованием для имитации расплава раствора поваренной соли в концентрации, близкой к насыщенному раствору [3]. Указанную выше проблему ограничения плотности тока удалось решить за счет увеличения относительно реальной напряженности магнитного поля. В качестве маркеров для наблюдения за движением жидкости использовались мелкие твердые частицы, образующиеся при разрушении электродов в результате электролиза или мелкие кусочки бумаги.

В ходе исследований на физической модели показана принципиальная возможность изучения движения рас-

плава под действием протекающего тока и внешних магнитных полей при использовании неметаллической токопроводящей прозрачной жидкости. Экспериментально определен характер течения жидкости в ванне ДППТ при подключении центрального или смещенного от оси ванны подового электрода. При воздействии на токонесущую жидкость вертикального магнитного поля возникает ее азимутальная закрутка, причем направление вращения расплава в горизонтальной плоскости меняется при изменении направления вертикального магнитного поля на противоположное. Показано, что при смещении оси подового электрода от оси ванны увеличивается средняя скорость вращения жидкости в горизонтальной плоскости. Так, при смещении подового электрода на расстояние  $4/5$  радиуса подины средняя скорость течения жидкости на поверхности ванны возрастает примерно в 2 раза. При этом размер застойной зоны вблизи боковых стенок ванны сокращается на 70%. В ходе экспериментов определен порядок напряженности внешнего магнитного поля для кондукционного перемешивания ванны ДППТ малой вместимости, составляющий 5 кА/м.

#### Термическая обработка

Нагрев заготовок в печи для термической обработки и обработки металлов давлением следует вести максимально быстро с ограничением на перепад температуры по их сечению. Перепад температуры по сечению заготовки вызывает возникновение в ней температурных напряжений. Температурные напряжения не должны превышать допустимых значений в упругой области, определяемых толщиной нагреваемого слоя металла и его химическим составом. Обработку режима нагрева предлагается осуществлять на физической модели [4].

Модель разработана для заготовки из широко распространенной стали ШХ15. Модель заготовки выполнена из силикатного кирпича. Такой выбор материала модели обусловлен тем, что материал модели должен выдерживать высокие температуры при нагреве и обладать невысокой теплопроводностью [5]. Измерение температуры на поверхности и в центре модели осуществлялось двумя термопарами. Между печью на производстве и печью-моделью, заготовкой и заготовкой-моделью выполнялось геометрическое подобие. Время нагрева модели определялось из условия равенства критерия Фурье для заготовки и модели. Расчет температуры в печи при нагреве модели выполнялся из условия равенства удельного теплового потока, подведенного к поверхности нагреваемого объекта излучением и конвекцией удельному тепловому потоку, отведенному вглубь объекта теплопроводностью. Полученные в результате моделирования данные о режиме нагрева были пересчитаны в значения температуры в промышленной печи, на поверхности заготовки и в центре заготовки.

#### Газоотсос

Моральный и физический износ введенного в строй десятки лет назад оборудования литейных цехов машиностроительных предприятий привел, в частности,

к необходимости модернизации систем газоотсоса. Для удаления газопылевых выделений из электродуговых печей емкостью 3...10 т используются системы, в состав которых входит улавливающий зонт, отводящий газоотвод, тканевый фильтр и вертикальная дымовая труба. В [6] описано усовершенствование поворотного зонта за счет применения специальных затворов, исключающих выход в окружающее пространство газопылевой смеси в местах расположения подвижных соединений составных элементов.

Перед проектированием модернизированного зонта была разработана методика и выполнен расчет энергосиловых параметров его поворота. Правильность принятых технических решений и корректность полученных расчетных зависимостей проверялась на модельном комплексе масштаба 1:10, включавшем действующие физические модели всех составных частей системы газоотсоса дуговой сталеплавильной печи емкостью 8 т.

В ходе моделирования был изучен характер изменения нагрузок в звеньях рычажного механизма модели зонта, возникающих при его переводе из рабочей позиции в исходную и обратно. Также было определено влияние слоя песка, выполняющего функцию затвора, на момент сопротивления повороту зонта.

Измерительный комплекс модели состоит из тензорезисторного преобразователя, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и компьютера с принтером. Тензорезисторный преобразователь был реализован на рычаге, передающем усилие от кривошипа пустотелой консоли. Для этого на его плоские поверхности вдоль продольной оси симметрии были наклеены два фольговых тензодатчика сопротивлением 200 Ом, подключенные к усилителю по полумостовой схеме. Снимаемый с полумоста сопротивлений электрический сигнал обрабатывался на компьютере, и на мониторе отображался тренд регистрируемой нагрузки с последующим выводом на печать.

При помощи описанного выше измерительного комплекса были проведены серии измерений действующей на рычаг продольной нагрузки при отсутствии и наличии сухого песка, обеспечивающего герметизацию подвижных сочленений газоотвода. Анализ результатов экспериментов показал, что суммарная сила сопротивления при повороте зонта, возникающая вследствие трения в верхнем и нижнем песочных затворах, составляет 20...26% от общей нагрузки, преодолеваемой приводом исследуемого механизма. Расчетные значения доли моментов, обусловленных трением в затворах, составляют 17...23%, что свидетельствует об адекватности физической модели.

Наряду с измерениями механических нагрузок выполнялось исследование потоков дыма, истекающего через зазоры при имитации процесса плавки. Дым подавали от дымогенератора в рабочее пространство модели печи. Выходящий через выпускной канал и технологические зазоры дым увлекался под зонтом и далее по отводящему трубопроводу поступал к вертикальной трубе

за счет разрежения, создававшегося дымососом. Весь объем выходящего из модели печи дыма удалялся из рабочей зоны. Протечек дыма через песочные затворы не было, то есть обеспечивалась надежная герметизация в узлах подвижных сочленений газоотвода.

Полученная в ходе исследований на модели информация была использована при подготовке рабочего проекта реконструкции системы газоотсоса дуговой печи емкостью 8 т.

### Заключение

В условиях развития компьютерной техники, численных методов, программных средств широкое распространение при решении производственных задач получило математическое моделирование. При этом физическое моделирование остается востребованным эффективным средством изучения сложных процессов, протекающих в технологических установках, и отработки производственных операций. Применительно к металлургии особый интерес представляет замена металла на неметаллический материал. Так, например, замена расплавленного металла на водный раствор соли в рассмотренных выше моделях кислородного конвертера и электродуговой печи позволила снизить стоимость и энергоемкость экспериментальных установок, повысить безопасность проведения опытов. Применение прозрачной жидкости вместо расплава металла в модели электродуговой печи позволило исследовать его движение с информативностью, принципиально недостижимой для непрозрачного расплава.

### Список литературы

1. Семькин С.И., Голуб Т.С., Семькина Е.В., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Изучение на физической модели кислородного конвертера характера потерь жидкости с брызгами в варианте применения низковольтных потенциалов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. 61(10): 755-759.
2. Миронов Ю.М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей. Чебоксары: ЧувГУ, 1997. 232 с.
3. Ячиков И.М., Портнова И.В., Ларина Т.П. Исследование на физической модели поведения токонесущей жидкости в ванне дуговой печи постоянного тока под действием внешнего вертикального магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. 61(1):28-34.
4. Крючков О.Б. Использование физического моделирования для определения температурного поля в заготовке // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. 61(1):12-20.
5. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла. М.: Машиностроение. 1973. 192 с.
6. Ерньоко С.П., Горбатюк С.М., Ткачев М.Ю., Ошовская Е.В. Совершенствование конструкции и модельные исследования работы системы газоотсоса электродуговой печи литейного цеха // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. 62(1):34-41.

*Захаров Николай Анатольевич — канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное подразделение «Дозор» ОАО «Концерн КЭМЗ». Контактный телефон (495) 640-09-47. E-mail nazakharov@npp-dozor.ru*