СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Шипельников А.А., Роготовский А.Н., Бобылева Н.А., Скаков С.В.

Аннотация. На сегодняшний день системы инженерного анализа процессов благодаря высокой точности расчетов и степени сходимости их результатов с достигаемыми на производственной практике показателями все более широко применяются для исследования непрерывной разливки стали. Такие мощные системы как «ANSYS» и «ProCast» позволяют успешно решать различные гидро-, газодинамические и тепловые задачи, параллельное протекание которых составляет сущность большинства металлургических процессов.

Авторским коллективом кафедры металлургических технологий ЛГТУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-480203р\_а был выполнен ряд компьютерных экспериментов по моделированию процессов, протекающих в промежуточном ковше и кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Исследования направлены на изучение возможности дальнейшего совершенствования конструкции модификаторов потока (перегородки, турбостопы, пороги) и режима продувки аргоном на параметры движения потоков расплава в рабочем пространстве 50-тонного промежуточного ковша (промковша), а также влияния конфигурации донной части погружных стаканов на движение расплава в кристаллизаторе при детерминированном динамическом режиме работы слябовой МНЛЗ.

Результатом расчетов явились поля скоростей потоков и температуры расплава по объему промковша и кристаллизатора, а также температурные поля в футеровке ковша, также получены выражения описывающие изменение средней скорости первичного потока формирующегося на выходе из отверстия погружного стакана в кристаллизаторе.

Предварительно полученные результаты позволяют более полно оценить изменения скорости и направления движения потоков расплава, формирования объемов с различной температурой расплава при использовании в промковше модификаторов потоков, в том числе, при использовании приёма «аргоновой завесы» в разливочной камере. Также получены данные по движению потоков расплава и смещению «пятен» размыва твердой «корочки» сляба, наличию градиентных температурных зон в различных областях пространства кристаллизатора, которые могут быть полезны инженерам-практикам занимающихся выбором погружных стаканов для конкретных условий разливки стали на МНЛЗ.

Эффективное управление движением потоков расплава в промковше и кристаллизаторе МНЛЗ позволяет существенно повысить качество слябов и проката в разрезе снижения отсортировки металла по дефектам сталеплавильного происхождения, связанным с наличием шлака, неметаллических включений и трещин, образующихся из-за недостаточной толщины «корочки» заготовки на выходе из кристаллизатора.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, CAE-системы, моделирование, промежуточный ковш, кристаллизатор, погружной стакан, модификаторы потока, гидродинамика потоков, расплав, МНЛЗ.

Сегодня в мировой инженерной практике в области металлургических технологий существует две мощные *CAE-*системы инженерного анализа процессов – «ANSYS» и «ProCast», принцип работы решателя которых основан на применении метода конечных элементов. При этом исходную 3D-модель объекта моделирования (стальковш, промковш, отливка, кристаллизатор МНЛЗ и пр.) строят в среде *CAD*-системы (AutoCAD, Компас 3D и пр.). Область применения данных компьютерных систем в сталеплавильном производстве пока ограничивается тремя факторами:

1) сложность представления начальных и граничных условий для конкретного вида металлургического агрегата или элемента конструкции, с которым контактирует металлическая, шлаковая или газовая фаза;

2) ограниченность базы данных в том числе отсутствие полноценной русифицированной версии интерфейса программных комплексов;

3) отсутствие или весьма высокая стоимость мощных инженерных станций, позволяющих выполнять расчет достаточно быстро и с достаточно высокой степенью сходимости получаемых решений на каждом последующем шаге итераций, ракурсе сравнения расчетных и реально наблюдаемых значений параметров процессов.

Последнее хотя и проистекает из проблемы точности построения сеточной модели объекта, но также косвенно связано с точностью задания условий расчета соответствующих реалиям производственной практике [1-5]. Тем не менее сегодня в русскоязычном секторе интернет-источников появляются первые зарубежные публикации об успешном применении в частности «ANSYS» для анализа и последующего совершенствования режима непрерывной разливки стали [6-9].

Авторским коллективом кафедры металлургических технологий ЛГТУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-480203р\_а был выполнен ряд компьютерных экспериментов по моделированию процессов, протекающих в промежуточном ковше и кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Исследования направлены на изучение возможности дальнейшего совершенствования конструкции модификаторов потока (перегородки, турбостопы, пороги) и влияния продувки аргоном на параметры движения потоков расплава в рабочем пространстве 50-тонного промежуточного ковша (промковша), а также влияния конфигурации донной части погружных стаканов на движение расплава в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Во многом идентичная реальному промковшу МНЛЗ (промковши и кристаллизаторы УНРС-4,6 ПАО «НЛМК») 3D-модель сборки, построенная в *CAD*-системе «Компас 3D V14», состояла из футеровки промковша, защитной трубы диаметром 95 мм, перегородок и турбостопов различной конструкции, порогов, и объема расплава. 3D-модель сборки кристаллизатора состояла из собственно модели кристаллизатора высотой 900 мм, моделей погружных стаканов с различной геометрией донной части и объема расплава при вертикальном участке примыкающей к кристаллизатору зоны вторичного охлаждения (ЗВО) в 1800-2000 мм.

Моделирование проводилось в лицензионных программах «ProCast 2013.5» и «ANSYS» (расчет продувки расплава аргоном). В качестве аппаратного обеспечения моделирования использовалась инженерная станция на базе «Intel Core i7», 3600 Гц, 64 Гб, HDD 1 Тб. Нами была выбрана марка стали AISI1008 из базы данных как наиболее подходящая для описания свойств группы низкоуглеродистых конструкционных марок сталей, температура расплава на входе в защитную тубу принималась равной 1550°С, начальная скорость выбиралась из условия обеспечения скорости разливки 1,1 м/мин на двухручьевой МНЛЗ при сечении сляба 1320x250 мм. Теплоизолирующий эффект шлака был учтен путем уменьшения коэффициента теплоотдачи между жидкой сталью и воздухом. Критерием достижения сходимости решений являлось примерное постоянство температуры и скорости с отличием не более чем на 1% от среднего значения величины в каждой точке расчетной области модели на каждой последующей итерации. Результатом расчетов явились поля скоростей потоков и температуры расплава по объему промковша, и температурные поля в футеровке ковша (рисунок 1, 2).

Рисунок 1 – Поле скоростей потоков металла в объеме промковша

Рисунок 2 – Температурное поле футеровки промковша

На рисунке 3 представлено сопоставление расчетного поля температуры и скорости потоков расплава в прямоугольном промежуточном ковше с одной полнопрофильной перегородкой при совместном решении тепловой и гидродинамической задачи в детерминированном динамическом режиме работы (ДДР) МНЛЗ [10].

Рисунок 3 – Сопоставление поля температуры (вверху) и поля скоростей (внизу) потоков в подшлаковой зоне 50-тонного промковша с одной полнопрофильной перегородкой

На рисунке 4 представлено векторное поле скоростей потоков расплава при использовании донных продувочных устройств в разливочных камерах для подачи аргона в так называемом «пузырьковом» режиме, основная задача которого перенаправить движение шлаковых включений из вторичных потоков расплава к границе раздела «расплав-шлаковое покрытие» на поверхности промковша. Несмотря на множество литературных данных по параметрам обработки расплава в промковше аргоном фундаментальной проблемой, реально сдерживающей применение продувки является малая прогнозируемость всплытия и удаления включений при варьировании конфигурации продувочных пробок и расхода аргона [11-13].

Рисунок 4 – Скорости потоков в промковше (сечение) при продувке аргоном

Предварительно полученные результаты позволяют более полно оценить изменения скорости и направления движения потоков расплава, формирования объемов с различной температурой при использовании в рабочем пространстве промковша различных модификаторов потоков, в том числе, при использовании приёма «аргоновой завесы» в разливочной камере.

При анализе процесса заполнения расплавом кристаллизатора гидродинамическая задача заключается в расчете поля скоростей (рисунок 5) и траекторий движения формируемых микропотоков расплава и шлаковых частиц, тепловая – в расчете поля нарастания твердой корочки вплоть до окончания участка ЗВО МНЛЗ, что ограничивается только аппаратными возможностями и временными факторами проведения моделирования [10, 14]. В процессе применения «ProCast» для анализа непрерывной разливки стали вскрылись две фундаментальных проблемы:

1) отсутствие отечественного (русскоязычного) опыта применения комплекса для решения одновременно двух задач – гидродинамической и тепловой (фактор *solid*), соответственно получаемые промежуточные результаты расчетов практически не с чем сравнивать, перед тем как принять решение об опытно-промышленном испытании прототипов новых конструкций стаканов, оснасток и пр.;

2) ограниченность публичной информации о величине основных тепловых и рабочих параметров НРС на действующих УНРС: температура воздуха над поверхностью шлака в кристаллизаторе, фактическая толщина и степень черноты шлака, коэффициент теплоотвода с поверхности «корочки», величина воздушного зазора по высоте кристаллизатора и пр.

Последнее подталкивает исследователей увязывать результаты промежуточных расчетов с точно фиксируемыми АСУ ТП НРС параметрами, например, прогнозом толщины «корочки» на выходе из кристаллизатора, состоянием температурного поля по развертке поверхности кристаллизатора, показания датчиков температуры начиная с датчика №«0» и т.п. [10, 15-20]. По результатам расчетов можно предположить, что при использовании «ловушки» и прочих равных условиях для кристаллизатора 250х1100х1400 мм, «пятно» размыва твердой «корочки» слитка находится на уровне около 350 мм по высоте от мениска расплава или 39% от общей высоты кристаллизатора, тогда как при использовании «рассекателя» место удара струи о стенку смещается в нижнюю часть кристаллизатора – около 440 мм или 49%. Иными словами, размыв еще весьма тонкой «корочки» сляба может происходить в зоне вероятно большей толщины твердой фазы, что должно снизить количество поверхностных трещин заготовки.

Рисунок 5 – Поле распределения скоростей потока вдоль широкой грани слитка: слева – при конструкции типа «ловушка», справа – при конструкции типа «рассекатель потока». Глубина погружения – 250 мм, прямоугольные отверстия 70x40 мм под углом 25°, внутренний диаметр – 74 мм

Получены уравнения зависимости средней скорости главного потока расплава, который формируется на выходе из отверстия стакана, частично ударяется об узкую грань кристаллизатора в зоне «корочки», формируя два главных потока: восходящий, закручивающийся в районе мениска – «зеркала» и нисходящий, который подвергается дальнейшей диссипации в вертикальной плоскости (рисунок 6).

При учете вертикальной части ЗВО МНЛЗ необходимо учитывать влияние типа стакана на характер гидродинамики формируемых потоков на расстояниях до 1500-1800 мм от «зеркала» металла. Далее эффект влияния типа конфигурации как бы рассеивается и начинает преобладать фактор типоразмера слитка и толщины сформированной корочки при заданной скорости разливки [14-16].

Рисунок 6 – Графики изменения средней скорости формируемого потока расплава вдоль широкой грани сляба от центра стакана

Ниже представлена система регрессионных уравнений, описывающих изменение средней скорости первичного потока по двум координатам (*x* – координата вдоль широкой грани от центра стакана, *y* – по высоте кристаллизатора от «зеркала» расплава), которая получена путем статистической обработки данных более 30 маркеров для каждого типа стакана:

а) для варианта с ловушкой:

  $v\_{ср}=89,44-0,15x, R^{2}=0,95$ (1)

где *x* – координата точки (маркера) вдоль широкой грани сляба, мм,

 $v\_{ср}=162,94-0,48z, R^{2}=0,95$ (2)

где *z* – координата точки по высоте широкой грани от «зеркала» металла в кристаллизаторе, мм.

б) для варианта с рассекателем потока:

 $v\_{ср}=82,90-0,15x, R^{2}=0,96$ (3)

 $v\_{ср}=127,14-0,31z, R^{2}=0,96$ (4)

Полученные уравнения, в том числе и зависимости рисунка 6, хорошо согласуются с некоторыми ранее полученными выражения для условий ДДР [10, 16]. Как известно, роль сформированных в верхней части кристаллизатора вторичных потоков расплава состоит в основном в перемешивании металла и выравнивании температурного поля в наиболее холодной зоне – середина половины широкой грани кристаллизатора от центральной части стакана.

*Заключение.* На сегодняшний день в зарубежных публикациях исследований проблематики совершенствования технологии непрерывной разливки имеются сообщения о высокой степени сходимости результатов численного моделирования с наблюдаемыми изменениями качества слябов в первую очередь по критериям сталеплавильных дефектов, связанных с наличием шлаковых или неметаллических включений. К перспективным направлениям развития внедрения *CAE*-систем в инженерную практику технологов сталеплавильного производства можно отнести следующее:

1) расчет тепловой и гидродинамической задачи и оптимизация конструкции промежуточных ковшей МНЛЗ, в том числе при варьировании толщины и состава футеровки, конфигурации и количества перегородок, строения разливочных камер, «турбостопов» и различных режимов донной продувки аргоном;

2) расчет и оптимизация конфигурации погружных стаканов кристаллизаторов в том числе при учете конструкции стакан-дозатора промежуточного ковша и учете толщины твердой «корочки» заготовки на выходе из кристаллизатора;

3) расчет и оптимизация конструкции внутреннего пространства стальковшей при варьировании толщины и состава футеровки, количества и расположения донных продувочных блоков для подачи аргона и азота.

К перспективным направлениям также следует отнести возможное решение полной задачи истечения расплава из защитной трубы стальковша на стенде с учетом конфигурации внутреннего пространства промковша, стакан-дозатора и погружного стакана, кристаллизатора и начала зоны вторичного охлаждения протяженностью до 2000 мм, что актуально для условий разливки группы марок низкоуглеродистой и низколегированной стали на подавляющем большинстве слябовых МНЛЗ вертикального и криволинейного типа, работающих на металлургических комбинатах России.

На сегодняшний день полученные нами выражения для оценки изменения скорости движения потоков, данные по смещению «пятен» размыва «корочки» и наличию градиентных температурных зон в различных зонах пространства кристаллизатора могут быть полезны инженерам-практикам занимающихся выбором погружных стаканов для конкретных условий производства и типов МНЛЗ.

Библиографический список

1. Смирнов, А.Н. Совершенствование методов моделирования и оптимизация параметров систем дозирования стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ [Текст]/ А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов // Научные труды Донецкого Национального Технического Университета, серия металлургия. – 2011. – 13 (194). – С. 40-47.

2. Development of Next-Generation Impact Pads for Producing Ultraclean Steel Using Mathematical Models and Plant Trials [Текст] /Tathagata Bhattacharya, Andrew J. Brown, Christopher M. Muller et al. // AISTech 2016 Proceedings. – Р. 1547-1572.

3. Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков. [Электронный ресурс]. URL: http://uas.su/books/mnlz/mnlz.php, (дата обращения: 30.10.2015 г.)

4. Повышение качества разливки путем использования оптимизированного погружного стакана / О. Винс, В. Мосснер, М. Раффершайд и др. [Текст]// Черные металлы. – 2012. – № 8. – С. 44-50.

5. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand / L Zhang, S. Yang, K. Cai, et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2007. – Vol. 38b – Р. 63-68.

6. Моделирование процессов поведения жидкой стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ [Текст]/ А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов и др. // Процессы литья. –2010. –№5. –С. 40-47

7. Solhed, H. Modelling of the Steel/Slag Interface in a Continuous Casting Tundish [Текст]/ H. Solhed, L. Jonsson, P. Jönsson //Steel research int. 79 (2008) No. 5. – Р.348-357.

8. Ефимова, В.Г. Теоретические исследования и физическое моделирование параметров рафинирования металла в промежуточных ковшах слябовой МНЛЗ при продувке аргоном [Текст]/ В. Г. Ефимова, А. В. Ноговицын, А. В. Кравченко // Процессы литья. – 2013. – № 2 (98). – С. 60-67.

9. Андрианов, Д. Н. Численное моделирование движения потоков стали в промежуточном ковше [Текст] / Д. Н. Андрианов, М. Н. Новиков, А. И. Столяров // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2010. – № 3. – С. 25-34.

10. Моделирование истечения расплава из погружных стаканов с учетом различной конфигурации донной части и вертикального участка МНЛЗ [Текст] / Шипельников А.А., Роготовский А.Н., Бобылева Н.А., Скаков С.В. // Заготовительные производства. – 2016. – №7. – С. 3-7.

11. Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish [Текст] / H. Arcos-Gutierrez, J. de J. Barreto, S. Garcia-Hernandez et al. // Applied Mathematics. – April. – 2012. pp. 1-16.

12. Глебов, В.П. Опробование погружаемых стаканов опытной конструкции на МНЛЗ в ОАО «НЛМК» [Текст] / В.П. Глебов, Г.Н. Кононыхин // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – 17-21 декабря 2014г. - Часть 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – С. 143-146.

13. Смирнов, А.Н. Исследование условий всплытия неметаллических включений при продувке аргоном жидкой ванны промежуточного ковша МНЛЗ. Сообщение 2 [Текст] / А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. – 2014. – том 57(№1). – С.19-25.

14. Исследование и моделирование процесса непрерывной разливки стали с помощью современных CAE-i-CAD-систем [Текст]/ Шипельников А.А., Роготовский А.Н., Бобылева Н.А. и др. // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2016. - №1. – С. 38-45

15. Бобылева, Н.А. Влияние конструкции погружного стакана на истечение расплава в процессе непрерывной разливки стали [Текст]/ Н.А. Бобылева, А.А. Шипельников, А.Н. Роготовский и др. // Современная металлургия нового тысячелетия: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – 8-11 декабря 2015г. - Часть 2. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2015. – С. 208-215.

16. Исследование взаимосвязи температуры со скоростью движения расплава на различных сечениях погружных стаканов в слябовом кристаллизаторе [Текст] / А.Н. Роготовский, И.М. Володин, А.А. Шипельников и др. // Заготовительные производства. – 2016. – №10.– С. 3-7.

17. Swirling flow effect in submerged entry nozzle on bulk flow in high throughput slab continuous casting mold [Текст] / S. Yokoya, S. Takagi, S. Ootani et al. // The Iron and Steel Institute of Japan International. – 2001. – Vol. 4, №10, – Р. 1208-1214.

18. Jowsa, J. Numerical Modelling of Metal/Flux Interface in a Continuous Casting Mould/ J. Jowsa, M. Bielnicki, A. Cwudziński [Текст] //Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – 60(№. 4). – С. 2905-2912.

19. Гущин, В.Н. Исследование влияния внешних воздействий на развитие двухфазной зоны стальных заготовок [Текст] / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1(103). – С. 200-204.

20. Бажуков, Д.О. Математическое моделирование теплового состояния непрерывнолитой слябовой заготовки с учетом конструкционных особенностей МНЛЗ [Текст] / Д.О. Бажуков, В.Д. Тутарова, Д.С. Сафонов // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. – 2013. –том 56 (№1). – С. 3-5.