

Дипл.-инж. Э. Х. Хильгенхёнер, д. ест. н. Э. А. Т. Вош

S&B Industrial Minerals GmbH, Оберхаузен, Германия

УДК 621.746.047

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ MouldScreen® В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ ШЛАКОВОЙ ПЛЕНКИ НА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ*

Приведены результаты исследований зависимости между свойствами различных марок стали и конструктивными характеристиками машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), с одной стороны, и физико-химическими свойствами подаваемых в кристаллизатор шлакообразующих смесей, а также образующихся в результате их применения шлаковых пленок, обволакивающих оболочку заготовки, с другой стороны. На основе обширных научных исследований было разработано программное обеспечение, которое позволяет визуализировать толщину и состояние шлаковой пленки, покрывающей всю внутреннюю полость кристаллизатора МНЛЗ. Одновременно производится индикация реальных параметров процесса непрерывной разливки в целом. В программу заложены данные о свойствах применяемых шлакообразующих смесей, благодаря чему MouldScreen® вычисляет и визуализирует состояния твердой и жидкой фракций находящихся в кристаллизаторе шлаков, а также толщину и температуру затвердевающей оболочки слитка. Данные отображаются на экране монитора. Лежащая в основе программы физико-математическая модель выдает всю необходимую информацию о процессах, происходящих в кристаллизаторе. Показания, выдаваемые термопарой МНЛЗ, принимаются во внимание при проведении модельных расчетов. Кроме того, в программу MouldScreen® включена так называемая «преобразующая» утилита Modify tool, которая облегчает подробный анализ влияния различных ключевых рабочих параметров на поведение шлаковой пленки и, соответственно, на условия смазываемости заготовки, а также на теплоотвод от слитка через стенки кристаллизатора. Эта функция позволяет моделировать влияние любого изменения в ключевых параметрах работы МНЛЗ на весь ход разливки. Первое испытание системы проведено на слябовой МНЛЗ в Германии.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, смазываемость кристаллизатора, визуализация шлаковой пленки.

ВВЕДЕНИЕ

Поведение шлаковой пленки между затвердевающей оболочкой сляба и внутренними стенками кристаллизатора крайне важно для повышения качества производимых заготовок, эксплуатационной безопасности и производительности труда на МНЛЗ.

С помощью современного инструментария, называемого компьютерной алгеброй [1–7], ранее едва ли поддающиеся учету математические подходы к моделированию процессов непрерывной разливки теперь мо-

гут быть воплощены в прикладные компьютерные программы. На основании обширных научных исследований, проведенных в рамках сотрудничества между Департаментом черной металлургии, Рейнско-Вестфальской высшей технической школой (RWTH) г. Аахена и компанией «S&B Industrial Minerals GmbH» разработан пакет программ, основанных на алгоритмах компьютерной алгебры, для визуализирования толщины шлаковой пленки и условий между поверхностным слоем заготовки и медной плитой кристаллизатора. Программа, названная MouldScreen®, описывает различия между жидким, спеченным и пористым шлаком в кристаллизаторе. Это в дополнение

к толщине шлаковой пленки визуализирует всю существенную информацию, такую как толщина оболочки затвердевающей заготовки, локальный тепловой поток или температура медной охлаждающей плиты. Все данные рассчитываются в зависимости от расположения в кристаллизаторе. При этом необходимые для модельных расчетов данные могут вводиться самыми разными способами. Возможен ручной ввод с клавиатуры, считывание данных со сравнительных таблиц технических характеристик формата Excel, экспорт данных ibaAnalyzer (с помощью математического обеспечения анализа данных компании iba AG, Германия) или интерактивная передача информа-

* Технический доклад на 43-м Международном семинаре сталелитейщиков, 20–23 мая 2012 г, Белу-Оризонти — МГ, Бразилия.

ции в режиме реального времени. Особым преимуществом программы MouldScreen® является легкость ее применения для параметрического анализа и инверсного моделирования. При этом анализируются и моделируются такие параметры, как толщина оболочки затвердевающей заготовки, интегральный и локальный тепловые потоки в мениске, термическое сопротивление летки в зоне мениска. Параметры представлены в виде функций от скорости разливки. Также система обнаруживает и визуализирует процессы формирования разнообразных неблагоприятных условий в кристаллизаторе, которые приводят к растрескиванию слябов, прорывам оболочки слитка, различным дефектам поверхности заготовок и неисправностям МНЛЗ. Помимо этого система MouldScreen® осуществляет сбор и обработку статистических данных о благоприятных (безопасных) и неблагоприятных (опасных) условиях разливки, что позволяет повысить качество управления МНЛЗ с учетом такого важного фактора, как свойства шлаковой пленки, обволакивающей заготовку. Одновременно в режиме реального времени проводится идентификация критических эксплуатационных режимов в кристаллизаторе, позволяющая принимать быстрые и целенаправленные контрмеры для повышения безопасности разливки и улучшения качества выпускаемой продукции.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

До настоящего времени толщину обволакивающей шлаковой пленки между корочкой заготовки и стенками кристаллизатора можно было прогнозировать только на рудиментарном уровне, принимая в расчет реальные параметры разливки на МНЛЗ.

Для того чтобы правильно отобразить совокупность процессов, происходящих в кристаллизаторе МНЛЗ, необходимы модельные расчеты, описывающие формирование и состояние шлаковой пленки, состав пока еще неизмеримой жидкой составляющей шлака и повторно затвердевших слоев шлакообразующих смесей.

Особое внимание должно быть обращено на теплопередачу пленки шлака, находящегося в кристаллизаторе. Вообще, такие модели основаны на уравнениях физического состояния. Для методов численного или статистического анализа характерны такие недостатки, как сложность формализации данных и программирования, слишком продолжительное для практического использования время проведения вычислений, большие погрешности получаемых результатов. Поэтому для непрерывной разливки стали математические методы аналитических решений фундаментальных уравнений физического состояния и последующих аналитических моделей применяются на практике довольно редко. Математические описания физических свойств тепловых явлений в кристаллизаторах МНЛЗ, описанные в этой работе, представляют собой причинно-следственную связь между дифференциальными и интегральными формулами энергетической теоремы, использующей реальные параметры работы машин непрерывного литья заготовок. Детальную информацию о формулах, приведенных на рис. 1, можно получить из специальной литературы [1, 2].

В отличие от других методов, при расчетах по алгоритму MouldScreen® на выходе получают данные о термическом сопротивлении (теплопроводности). Для определения толщины шлаковой пленки и ее термиче-

ского сопротивления, которое в последующих расчетах будет обозначаться GP , нужен множитель, определяющий удельную теплопроводность шлака. Эти данные можно получить из Атласа шлаков [8].

На рис. 2 представлены данные о величинах GP в области мениска GP_0 в зависимости от скорости разливки. Начиная с установок с невысокой скоростью и далее через установки для непрерывной разливки круглых трубных заготовок вплоть до скоростных установок непрерывной разливки тонких слябов термическое сопротивление в зоне мениска уменьшается примерно на порядок, а следовательно, примерно в такой же пропорции уменьшается толщина шлаковой пленки. Так как удельная теплопроводность шлаковой пленки является константой, то можно сделать вывод, что с увеличением скорости разливки толщина смазывающей шлаковой пленки резко сокращается. Происходит это не только в области мениска, но и в более низкой области кристаллизатора. Это подтверждается и практическими измерениями: при увеличении скорости разливки расход шлакообразующей смеси в кристаллизаторе снижается, а это значит, что толщина обволакивающей заготовку шлаковой пленки уменьшается.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ MouldScreen®

При применении программного пакета MouldScreen® затраты усилий и времени при программировании работы МНЛЗ значительно уменьшаются. Также снижаются требования к памяти компьютера и времени проведения вычислений. Другое преимущество программы — возможность инверсного (обратного) моделирования и изучения параметров во время ин-

Дифференциальный энергетический баланс

$$\rho_s c_{p,s} \left\{ v_g \left(\frac{\partial}{\partial x} T(x, y, z, t) + \frac{\partial}{\partial t} T(x, y, z, t) \right) \right\} = \lambda_{Fe} \left\{ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, y, z, t) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} T(x, y, z, t) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} T(x, y, z, t) \right) \right) \right\}$$

Операционные параметры кристаллизатора (входные данные)

- Скорость разливки
- Специфические свойства стали
- Свойства литейного шлака
- Параметры охлаждения кристаллизатора
- Конструкция (форма) кристаллизатора
- Параметры поступательно-возвратного «качания» кристаллизатора и т. д.

Интегральный энергетический баланс кристаллизатора

$$E = \iint q(x, y, z, t) dA dt$$

Локальная плотность теплового потока:

$$q(x, y, z, t)$$

Термические характеристики кристаллизатора МНЛЗ

Рис. 1. Базовые принципы и компоненты модели

терактивной работы, т. е. во время сбора информации, расчетов и визуализации происходящих в кристаллизаторе процессов.

Центральная идея при разработке алгоритма MouldScreen® состояла в том, чтобы обеспечить постоянную визуализацию процессов образования и состояния шлаковой пленки между оболочкой твердеющего ручья и стенками кристаллизатора, влияющих на эффективность непрерывной разливки и качество выпускаемой продукции. Визуализация должна осуществляться в рамках общего мони-

торинга текущих условий разливки стали. Решение таких задач требовало разработки программы, учитывающей конструкционные особенности кристаллизатора, параметры его работы, а также химический состав разливаемой стали и свойства используемой шлакообразующей смеси.

Ввод данных может быть облегчен с помощью таблиц форматов Excel, ibaAnalyzer или передачи вводимых значений в режиме реального времени. На рис. 3 и 4 представлены примеры различных экранов ввода

данных. После завершения сбора данных программа вычисляет весь набор релевантных переменных, таких как:

- толщина поверхностного слоя (оболочки) заготовки,
- локальная и интегральная плотность теплового потока,
- температура воды в охлаждающихся каналах/щелях,
- температура медной охлаждающей плиты на горячих и холодных сторонах,
- поле распределения температур внутри оболочки заготовки,
- термическое сопротивление (теплопроводность), состояние (жидкое, кашеобразное, твердое) и толщина пленки шлака между заготовкой и стенками кристаллизатора.

Непосредственно после задания марки разливаемой стали и выбора используемой шлакообразующей смеси результаты калькуляции отображаются на мониторе в виде разнообразных окон. Для слябовых и тонкослябовых кристаллизаторов результаты расчетов выводятся на экран в виде отдельных кривых для каждой медной стенки.

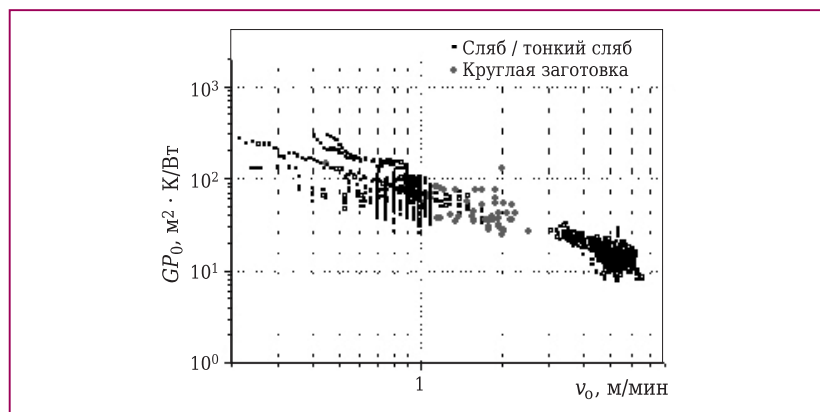


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления GP_0 шлаковой пленки в зоне мениска от скорости разливки v_0 ; расчеты выполнены в программе MouldScreen®

Пример прогрессии толщины оболочки, локального теплового потока и температуры поверхности сляба как функции от расстояния до мениска показан на рис. 5. Соответствующие кривые показаны в левой части изображения. Они рассчитаны для средних значений ширины сляба. Чтобы получить данные для различных положений кристаллизатора, можно в желаемых местах экрана открыть соответствующие всплывающие окна. Например, на рис. 5 приведены результаты расчетов для положения на 200 мм ниже мениска. Таким образом, можно легко произвести сравнение толщины оболочки, локальной плотности теплового потока и температуры поверхности слябов. В правой части рис. 5 представлены данные сравнения интегральных плотностей тепловых потоков четырех плит кристаллизатора.

Другое окно содержит информацию о температуре наружного слоя медной охлаждающей плиты и толщине шлаковой пленки. В левой части рис. 6 показано среднее значение температуры медной плиты вместе с усредненными данными измерений термопары (при ее наличии). Температуры горячей стороны показаны красным цветом, холодной — синим, а средневзвешенные температуры показаны как зеленые круги. Рассчитанные программой прогнозы для термопар показаны пунктирной линией. Таким образом, уже известные окна данных позволяют производить сравнение температур медной плиты для широких и узких сторон на протяжении всей активной длины кристаллизатора.

Температуры поверхности сляба и соприкасающейся (горячей) стороны медной плиты, определяют температурные условия окружающей среды для разливочного шлака. Тем са-

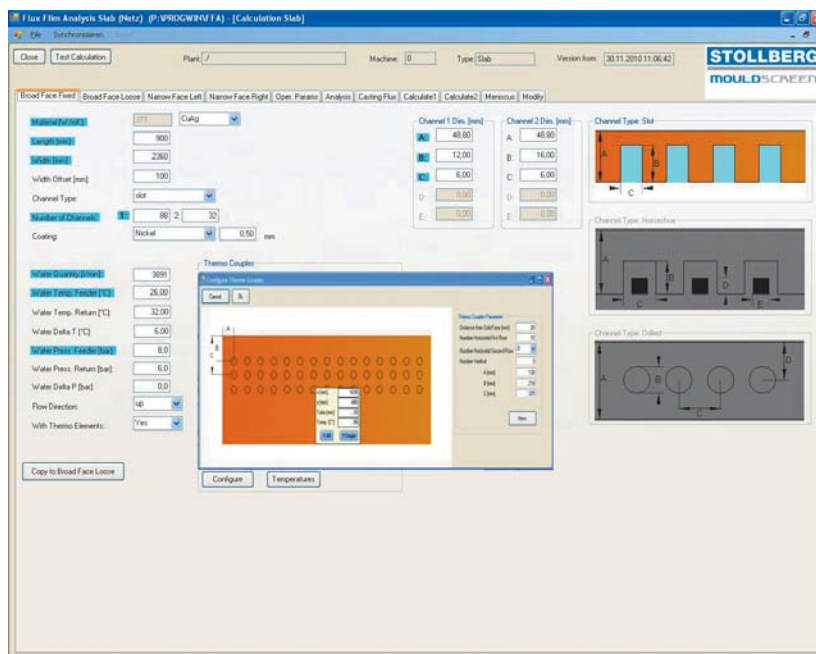


Рис. 3. Экран ввода данных: геометрии кристаллизатора, охлаждающей воды, термопары

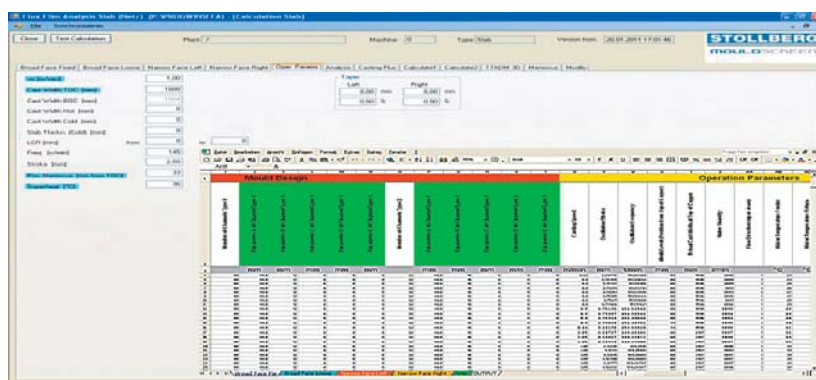


Рис. 4. Экран ввода данных: скорости разливки, ширины заготовки, регулятора уровня металла в кристаллизаторе, конусности, колебаний, наибольшей температуры; отредактировано в формате таблицы Excel

мым могут быть определены характеристические температуры шлака и температуры твердой и жидкой фракций шлаковой пленки.

В правой части рис. 6 показаны кривые: серая — общая толщина шлаковой пленки, синяя — толщина затвердевающего слоя сляба, красная — толщина кашеобразного слоя и желтая — жидкого шлака. Влияние различных предположений об удельной теплопроводности шлака выражено жирной пунктирной линией (не изображена на рис. 6). Диаграмма показывает,

что жидкая шлаковая пленка, обеспечивающая смазываемость, не всегда достигает конца кристаллизатора.

Расчеты толщины слоев жидкой и твердой фракций шлаковой пленки для различных типов слябовых и тонкослябовых МНЛЗ были опубликованы ранее [3–7]. Как и ожидалось, были выявлены существенные различия в поведении шлака при разных скоростях разливки. Для проведения дальнейших исследований влияния различных режимов работы и конструктивных особенностей кристалли-



Рис. 5. Экран вывода данных: толщины поверхностного слоя заготовки, температуры поверхности слэба, локальной и интегральной плотности теплового потока через активную длину кристаллизатора



Рис. 6. Экран вывода данных: температуры медной холодильной плиты, показаний термопары, толщины шлаковой пленки, состояния шлака

затворов МНЛЗ на толщину и состояние шлаковых пленок в рамках рассматриваемого программного обеспечения была разработана утилита Modify tool (Изменить). Это — настоящая инновация в оценке рабочих характеристик порошковых шлакообразующих смесей, применяемых при непрерывной разливке стали. Она позволяет быстро проанализировать различные операционные сценарии

для данной МНЛЗ и одним кликом клавиши компьютерной мыши вывести результаты анализов на экран монитора. Главный экран утилиты показан на рис. 7. Это окно подразделено на различные подокна, предназначенные для визуализации расчетных данных и графики.

На левой стороне экрана выводится обобщающая информация о ходе текущего процесса непрерывной разливки. Гисто-

граммы показывают температурные условия в области мениска. На правой стороне экрана визуализируются данные о различных фазах состояния шлаковой пленки (твердое, кашеобразное, жидкое) на двух широких и узких сторонах кристаллизатора. С помощью утилиты Modify tool можно выводить на экран как реальные параметры текущей разливки, так и расчетные, смоделированные программой для измененных параметров рабочего процесса. С помощью клавиши с зависимой фиксации можно осуществлять быстрое переключение различных экранов вывода данных вперед и назад. Таким образом, можно делать прямые оценки изменений выходных характеристик процесса разливки стали в зависимости от изменений ее входных условий (рабочих параметров). На поставленные вопросы типа: «Что произойдет, если, например, изменить скорость разливки, давление подачи охлаждающей воды или температурный режим?» программа MouldScreen® будет быстро отвечать в интерактивном режиме.

При этом, конечно, возможны комбинации изменений в рабочих параметрах. Становятся очевидными преимущества аналитического моделирования и математической формализации разнообразных физических зависимостей. Для офлайн-режима работы также предусмотрены варианты возможных изменений материала и толщины медной плиты, а также состава и толщины обволакивающего шлака.

На рис. 8 в качестве примера показано влияние скорости разливки на жидкую и твердую фракции шлаковой пленки. Обзор включает только скриншоты широких сторон кристаллизатора. Скорость разливки может быть изменена с помощью

перемещаемого маркера, результаты этого изменения немедленно появятся на экране. Поведение этих четырех плит кристаллизатора визуализируется отдельно. Пример на рис. 8 показывает толщину шлаковых пленок при четырех различных скоростях разлива (0,6, 1,0, 2,0 и 3,0 м/мин) и дает возможность наглядно сравнить их друг с другом. Снимки сделаны при исходной скорости разлива $v_c = 1,15$ м/мин, изменения в скоростной режим вносились с использованием контроллера Modify- v_c . Как видно на четырех представленных на рис. 8 изображениях, соотношение жидкого, кашеобразного и твердого состояний шлаковой пленки на протяжении активной длины кристаллизатора изменяется. При более высоких скоростях разлива жидкая фракция проникает все глубже в активную зону кристаллизатора. Одновременно шлаковая пленка становится тоньше. В приведенном примере расчетные значения толщины пленки в мениске для фиксированной широкой стороны кристаллизатора уменьшаются с возрастанием скорости разлива:

Толщина пленки в мениске, мм 1,86 0,93 0,47 0,31
Скорость разлива, м/мин . 0,6 1,0 2,0 3,0

Последнее значение близко к области рабочих скоростей установок, предназначенных для разлива стали в тонкие слябы.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОПЫТНОЙ ИНСТАЛЛЯЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

В декабре 2011 г. программное обеспечение MouldScreen® было установлено на слябовой МНЛЗ в Германии, для того чтобы сравнить результаты расчетов и визуализации системы



Рис. 7. MouldScreen® Modify tool выводит на экран вариации изменений эксплуатационных параметров МНЛЗ и их воздействие на температуру медной холодильной плиты, а также на фазы состояния шлаковой пленки (твердое, кашеобразное или жидкое)

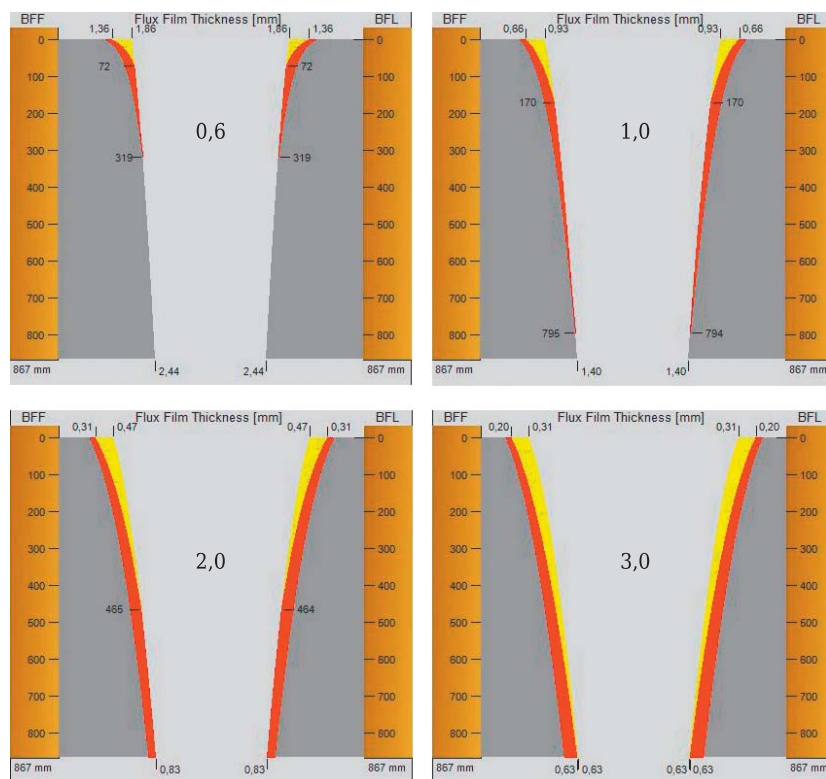


Рис. 8. MouldScreen® Modify tool: вариация скоростей разлива (0,6, 1,0, 2,0, 3,0 м/мин) и результативные изменения состояния шлаковой пленки

MouldScreen® со стандартной системой регистрации данных. Это особенно интересно при сравнении данных, зарегистри-

рованных во время неустойчивых условий разлива, например в ситуациях, когда срабатывает аварийная система преду-

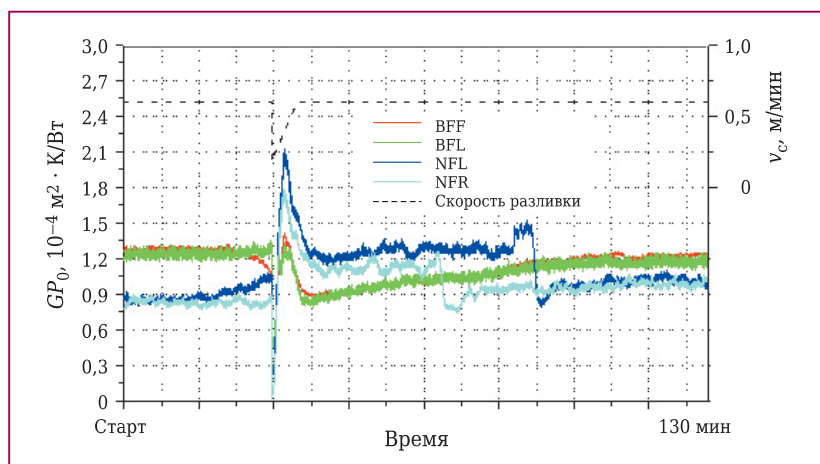


Рис. 9. Расчетные значения термического сопротивления (теплопроводности) шлаковой пленки на мениске и скорость разливки до, во время и после подвисания заготовки

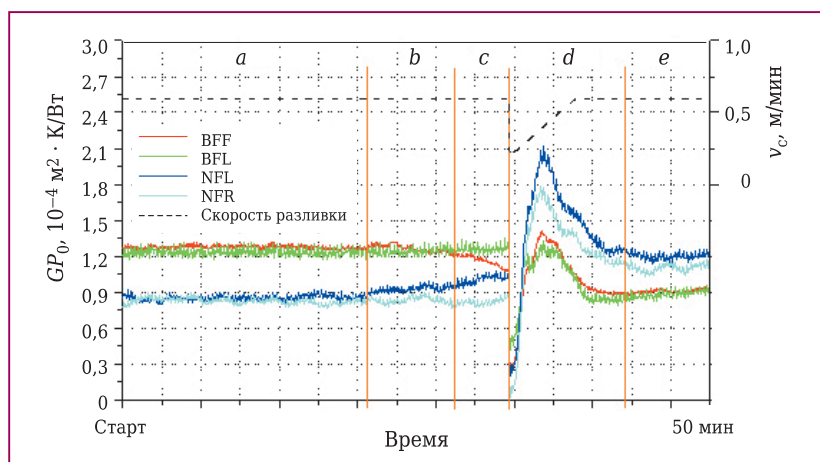


Рис. 10. Расчетные значения термического сопротивления шлаковой пленки на мениске и скорость разливки во время застревания заготовки: а–е — характеристические сегменты времени до и после аварийного сообщения о подвисании заготовки

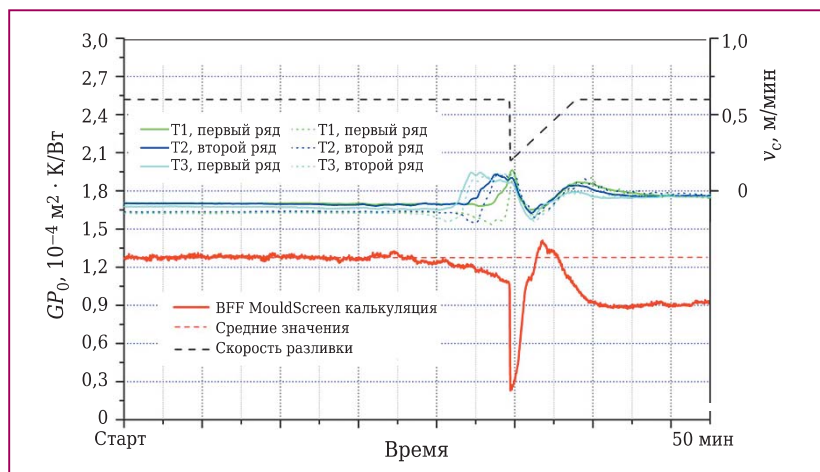


Рис. 11. Термическое сопротивление шлаковой пленки на мениске для BFF и соответствующие показания термопар Т1–Т3 во время аварийного сообщения о подвисании заготовки

преждения о подвисании заготовки. На следующем этапе аварийная ситуация, зафиксированная стандартной системой обнаружения подвисания заготовки, визуализировалась и оценивалась системой MouldScreen®.

На рис. 9 представлены расчетные значения термического сопротивления шлаковой пленки на мениске (GP_0). Показаны данные за период разливки продолжительностью ~130 мин. Графики представляют значения, рассчитанные по алгоритму программы MouldScreen® для широких (broad) и узких (narrow) сторон кристаллизатора. В начале (на старте) разливки значения GP_0 для широких сторон составляли $0,0012 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, для узких — $0,0009 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Это означает, что шлаковая пленка на широких сторонах была толще, чем на узких. При этом предполагается, что величина теплопроводности шлаковой пленки во всей зоне мениска постоянна. Во время разливки произошло подвисание заготовки, которое было зафиксировано автоматической системой мониторинга хода производственного процесса и компенсировано понижением скорости разливки. Во время этого события и даже незадолго до него было отмечено значительное нарушение толщины шлаковой пленки. На графике видно, как после начальных высоких амплитуд колебания значений GP_0 постепенно успокаиваются и значения опять выравниваются. Следует отметить, что после устранения помехи толщина шлаковых пленок на узких сторонах кристаллизатора увеличилась по отношению к толщине на широких. К концу наблюдаемого интервала времени значения GP_0 медленно возвращаются к исходным уровням. При этом после устранения подвисания заготовки значения GP_0 на широких сторонах кристаллиза-

тора растут плавно, а на узких — достигают исходного уровня двумя заметными скачками. Различные фазы разливки (до и после подвисяния) детально представлены на рис. 10.

Фаза *a*. Нормальные условия разливки. На обеих широких сторонах кристаллизатора постоянная толщина шлаковой пленки, это также относится и к узким сторонам. Однако толщина шлаковой пленки на узких сторонах меньше, чем на широких.

Фаза *b*. Значения GP_0 на широкой фиксированной стороне кристаллизатора (BFF) и на узкой левой (NFL) неустойчивы, они двигаются навстречу друг другу. В конце фазы *b* значения GP_0 на NFL уже существенно отличаются от значений на NFR (узкой правой стороне).

Фаза *c*. Значения GP_0 на BFF уменьшаются до такой степени, что к моменту подвисяния заготовки уравниваются со значениями на NFL. Можно предположить, что причина подвисяния находится в области между NFL и BFF.

Фаза *d*. В начале этой фазы автоматическая система мониторинга разливки выдала сигнал тревоги по поводу подвисяния заготовки. Скорость разливки была снижена. После устранения помехи машина медленно повышала скорость разливки до ее изначального значения. На графике видно, что значения GP_0 на всех четырех медных холодильных плитах кристаллизатора подвергаются массивным помехам; они начались с внезапного резкого понижения с последующим скачком вверх. При этом на обеих узких плитах данные значения даже превысили уровень значений GP_0 на широких плитах (произошла инверсия значений GP_0).

Фаза *e*. После возвращения скорости разливки к прежнему

уровню (который был до возникновения неполадки) процесс разливки вновь стабилизировался, однако инверсия значений GP_0 сохранилась. Как можно увидеть на рис. 9, значения GP_0 возвращаются к их первоначальному уровню значительно позже.

На рис. 11 представлен тот же самый период, что и на рис. 10, но на нем изображен график значений GP_0 только для BFF. Результаты измерений, выдаваемые термopарами, которые вызвали тревогу, показаны в середине диаграммы (без масштабной линейки, чтобы облегчить восприятие графика). Есть два ряда термopар (первый и второй), показания которых позволяют определить возникновение подвисяния заготовки. Можно заметить, что изображенная на графике кривая значений GP_0 значительно отклоняется от среднего значения еще до того, как была объявлена аварийная ситуация, вызванная подвисянием. Среднее значение GP_0 BFF обозначено красной пунктирной линией. Этот уровень рассчитан на основании данных, характерных для нормально и без каких-либо помех работающей МНЛЗ.

После объявления тревоги процесс разливки некоторое время происходил при инвертированных значениях GP_0 на широких и узких холодильных плитах. Затем значения вернулись к нормальным уровням сначала на NFR, а затем на NFL. Тем временем значения GP_0 на BFF и BFL медленно, но устойчиво возвращались к нормальному уровню (см. также рис. 9, справа).

На рис. 12 изображена последовательность скриншотов, подготовленных с помощью утилиты Modify tool программы MouldScreen[®], для фаз от *a* до *e*, а также скриншот в момент завершения описанной выше пробной разливки, который на-

ступил приблизительно через 130 мин после ее начала (см. рис. 9). В отличие от рис. 9–11 на рис. 12 приведены непосредственно данные о толщине шлаковой пленки на всех четырех медных плитах (BFF, BFL, NFL, NFR). Чтобы рассчитать толщину шлаковой пленки на разных участках, необходимо знать ее удельную теплопроводность. В верхней части кристаллизатора общая толщина пленки складывается из шлака, находящегося в жидкой фазе (изображена желтым цветом) и фазе кашеобразного состояния (изображена зеленым цветом). Для простоты восприятия различные толщины и глубины слоев даны в миллиметрах. Локализация соответствующих изотерм приведена для конкретного химического состава используемой шлакообразующей смеси, показаны также уровень расположения кристаллизатора и его активная длина.

Изображение для фазы *a* показывает, что на широких плитах шлаковая пленка более толстая, чем на узких, и что на широких сторонах шлак в жидком и кашеобразном состояниях глубже проникает в активную зону кристаллизатора, чем на узких.

Во время фазы *b* все шлаковые пленки становятся более толстыми и увеличивается глубина проникновения жидких и кашеобразных фракций вглубь кристаллизатора. Это позволяет предполагать, что именно изменения в шлаковой пленке во время этой фазы вызвали аварийную ситуацию (подвисяние).

Непосредственно перед сигналом об аварийной ситуации (подвисянии) толщина шлаковой пленки и глубина ее проникновения в зонах плит BFF, BFL и NFR уменьшились. При этом в зоне NFL формируется почти такая же шлаковая пленка, как и на BFF (см. рис. 12, c). Дан-

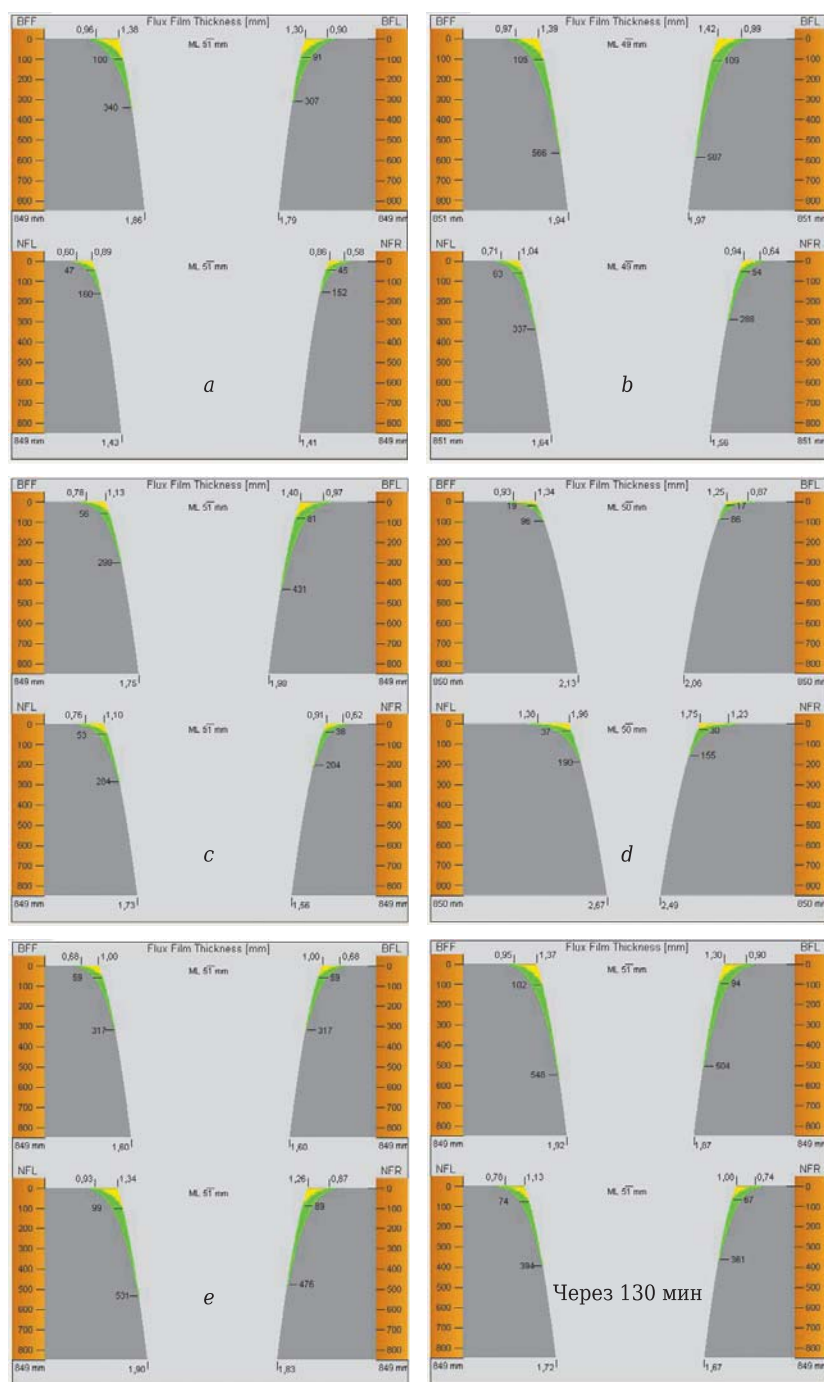


Рис. 12. Применение программного обеспечения MouldScreen® к фазам *a–e* и окончание периода мониторинга (продолжительность разливки 130 мин)

ные, снимаемые с термопар (на рисунках не указаны) показывают, что аварийная ситуация была вызвана повышением температур в крайней области между плитами BFF и NFL. Динамика кривых GP_0 в зонах BFF и NFL непосредственно перед аварийной ситуацией (см. рис. 10) сви-

детельствует о том, что обе кривые в этой фазе разливки сближаются и практически уравниваются.

На рис. 12 показано состояние шлаковой пленки в фазе *d*, когда вскоре после аварийной ситуации скорость разливки медленно возобновляется. Плен-

ки на всех медных плитах, за исключением BFL, стали значительно более толстыми, чем во время фазы *c*. На узких плитах их толщина на выходе из кристаллизатора составляет ~2,5 мм. Глубины проникновения в кристаллизатор жидких и кашеобразных шлаков во время фаз *c* и *d* уже инвертированы. Это означает, что теперь глубина проникновения вышеуказанных фракций у узких плит больше, чем у широких.

Во время фазы *e* происходит выравнивание и стабилизация параметров разливки. Как было видно на рис. 10, значения GP_0 на узких плитах выше, чем на широких (инверсия GP_0). Толщины слоев и глубины их проникновения во время этой фазы такие же, как в фазе *b*, но их значения для широких и узких плит инвертированы.

Как было показано на рис. 9, в течение данной разливки состояние шлаковой пленки до завершения фазы *e* так и не достигло своих нормальных значений. Как уже упоминалось, это произойдет как на широких, так и на узких плитах только после значительного временного шага. При этом на широких сторонах кристаллизатора нормализация будет происходить плавно, а на узких — резко. Окончательная нормализация параметров разливки произойдет лишь к ее завершению, примерно на 130-й минуте. К этому времени толщины шлаковых пленок и глубины их проникновения в кристаллизатор в зонах широких плит вновь окажутся большими, чем на узких плитах (как это было во время фазы *a*). При этом жидкая и кашеобразная фракции шлака на последней фазе будут представлены в более явном виде, чем во время нестабильной начальной фазы разливки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение MouldScreen® разработано для того, чтобы можно было определять влияние свойств разнообразных марок разливаемой стали, шлакообразующих смесей, засыпаемых в кристаллизатор, а также конструктивных особенностей и методов эксплуатации МНЛЗ (например, качества и толщины меди, из которой изготовлена медная плита, скорости непрерывной разливки стали, параметров водного потока системы охлаждения и т. д.) на формирование и поведение шлаковой пленки, обволакивающей и смазывающей затвердевающую в кристаллизаторе заготовку. Благодаря этому программному обеспечению стало возможным контролировать и визуализировать новые параметры разливки и в итоге существенно повысить промышленную безопасность и оптимизировать качество производимых слабов. С использованием программной утилиты Modify tool (Изменить) появилась возможность одним кликом компьютерной мыши оперативно менять параметры работы всей МНЛЗ и немедленно получать визуализированные на мониторе результаты этих изменений. Иными словами, задумав поменять, например, свойства подаваемой в кристаллизатор шлакообразующей смеси, или скорость разливки, или интенсивность потока охлаждающей воды и даже саму конфигурацию кристаллизатора МНЛЗ, оператор немедленно увидит на экране монитора, как отразятся эти изме-

нения на всем процессе непрерывной разливки стали в целом. Таким образом, утилита Modify tool комплекта программного обеспечения MouldScreen® является ценным нововведением в практику мониторинга разливки стали.

Первые же испытания программного обеспечения MouldScreen® на слабовой МНЛЗ в Германии выявили, что в результате внедрения этой системы операторы установок непрерывной разливки стали начали получать ценные данные, необходимые для управления производственным процессом. Ранее эти данные были недоступны. Правильная интерпретация новых данных позволяет не только повысить качество выпускаемой продукции и эффективность самого производственного процесса, но и отсеивать ложные сигналы автоматических систем слежения за подвисанием заготовок на МНЛЗ.

* * *

Авторы выражают благодарность профессору, д. т. н. Дитеру Зенку (Институт металлургии черных металлов / Рейнско-Вестфальская высшая техническая школа (RWTH) г. Ахен) за его превосходную поддержку в течение всего срока работы над проектом, а также г-ну Рольфу Муно (IT-специалист компании «S&B Industrial Minerals GmbH», Оберхаузен, Германия) за великолепно выполненные работы по программированию.

Библиографический список

1. **Wosch, E. A. T.** Prozeßübergreifende Modellbildung als Beispiel integrativer Lösungen beim Stranggießen von Stahl / E. A. T. Wosch // 21. Aachener Stahlkolloquium, 14. / 15. September 2006.
2. **Wosch, E. A. T.** Charakterisierung thermischer Betriebszustände von Stranggießkokillen unter Berücksichtigung des Gießschlackeverhaltens / E. A. T. Wosch // 24. Aachener Stahlkolloquium, 17. / 18. September 2009.
3. **Wosch, E. A. T.** New Approaches in mould slag film prediction and visualisation / E. A. T. Wosch, E. H. Hilgenhöner // ABM Brasil — 41st Steelmaking Seminar — International, 23. / 26. May 2010, Resende -RJ-, Brasil.
4. **Wosch, E. A. T.** Neue Methoden der Stranggiessmodellierung / E. A. T. Wosch, E. H. Hilgenhöner // Stahl und Eisen. — 2011. — № 4.
5. **Hilgenhöner, E. H.** Flux film Assessment via MouldScreen® / E. H. Hilgenhöner, E. A. T. Wosch // AISTech 2011. 2–5 May 2011, Indianapolis, U. S. A.
6. **Hilgenhöner, E. H.** MouldScreen®, A new system to predict flux film behaviour in continuous casting / E. H. Hilgenhöner, E. A. T. Wosch // METEC InSteelcon 2011 ; 7th ECCC, Düsseldorf, 27 June – 1 July 2011.
7. **Hilgenhöner, E. H.** Latest Results of Flux Film Visualization with MouldScreen® / E. H. Hilgenhöner, E. A. T. Wosch // IAS Argentina — 18th Steelmaking Conference, 01–03. Nov. 2011, Roario / Argentina.
8. **Mills, K. C.** Thermal conductivities of slags; Optical properties of slags / K. C. Mills, M. Susa ; 2nd Edition // Slag Atlas : Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1995, Chapter 15 and 16. ■

Получено 20.03.13
© Э. Х. Хильгенхёнер,
Э. А. Т. Вощ, 2013 г.