

Применение технологии цифровых двойников для кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок*

Починская В.А., Топольский Д.В., Ячиков И.М., Беляков А.Е.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

г. Челябинск, Российская Федерация

pochinskaiava@susu.ru, topolskiidv@susu.ru, iachikovim@susu.ru, alex.beliakov@susu.ru

Аннотация. Данная статья посвящена вопросу разработки цифрового двойника кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок. При создании математической и компьютерной моделей тепловой работы медной стенки кристаллизатора с цилиндрическими или щелевыми каналами водяного охлаждения были проанализированы существующие методики теплового расчета. На их основе разработаны алгоритмы, позволяющие определять перепады температуры охлаждающей воды, изменение средней температуры поверхности охлаждающих каналов, а также температуры рабочей стенки без покрытия и с износостойким покрытием, в зависимости от скорости разливки металла и расхода охлаждающей воды в каналах. В рамках создания цифрового наблюдателя и виртуальной системы мониторинга технического состояния оборудования кристаллизатора слывовой МНЛЗ при его эксплуатации разработаны математические модели для определения гидравлических и тепловых параметров медных стенок кристаллизатора, структура цифрового двойника и озера данных в качестве масштабируемого универсального хранилища неоднородных и неструктурированных данных.

Ключевые слова: цифровой двойник, озеро данных, кристаллизатор, МНЛЗ.

ВВЕДЕНИЕ

Технология, используемая для непрерывной разливки стали, значительно продвинулась за последние несколько десятилетий. Производительность процесса непрерывного литья, как правило, регулируется скоростью литья, которая зависит от состава сплава и геометрии изделия. Решением является разработка численных моделей, позволяющих просчитать тепловое состояние слитка в режиме реального времени и методами машинного обучения настроить систему охлаждения слитка таким образом, чтобы минимизировать количество трещин в соответствии с базой знаний имеющихся дефектов. Данная модель позволяет в режиме реального времени рассчитывать и изменять параметры разливки для достижения оптимального качества через платформу сбора данных или промышленный интернет вещей.

Концепция Индустрии 4.0 диктует необходимость применения инновационных технологий в производстве. Актуальность приобретает внедрение цифровых двойников процессов, крупномасштабных систем и даже целых предприятий.

В эпоху больших данных в цифровой вселенной появился новый термин, называемый озером данных, прототипом цель которого – объединить все полученные данные, чтобы дать более ценную информацию с большей степенью детализации.

Отличительной особенностью Озера является то, что оно привлекает больше внимания со стороны бизнеса, а не академических исследовательских областей. Однако вместе с ростом объема данных вычислительные мощности современных компьютеров и их сетей растут экспоненциально, создавая потенциал развития интеллектуальных методов анализа информации.

Таким образом, для управления системой созданных математических моделей и количественных параметров будет использована технология цифрового двойника слывовой кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок с применением озера данных.

АКТУАЛЬНОСТЬ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ВОПРОСА

Исследование под руководством Б. Томаса [1], применяя трехмерное моделирование модели больших вихрей (LES) и метод конечных объемов жидкости для фаз шлага и расплавленной стали, получает новое представление о влиянии угла отверстия сопла погружного стакана на переходный поток, движение верхней границы раздела шлаг/сталь и поведение шлага во время непрерывной разливки.

Группа исследователей под руководством М.П. Гусева [2, 3] представила результаты тестирования оптоволоконных датчиков измерения температуры в составе разработанного опытного комплекса мониторинга тепловых процессов в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок. Здесь проведено сравнение качества измерения температур оптоволоконными датчиками и классическими хромель-алюмелевыми термопарами. Разработан прототип цифрового двойника кристаллизатора для оценки полного теплового состояния кристаллизатора. Внедрение на металлургические предприятия данного Цифрового двойника слитка позволит внедрить в кристаллизатор оптоволоконную систему измерения температур, позволяющую в режиме реального времени определять распределение температур и теплового потока в кристаллизаторе, а также внедрить систему управления качанием кристаллизатора.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Челябинская область – регион развитой черной металлургии, представленной такими предприятиями, как ПАО "ММК" и "Мечел". В настоящее время более половины всей стали в России и за рубежом разливается с помощью машины непрерывного литья заготовок (рис. 1).

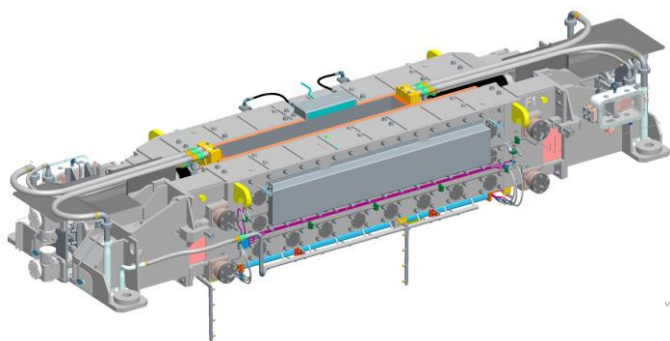


Рис. 1. Кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок

Результаты внедрения цифрового двойника кристаллизатора МНЛЗ способны оказать позитивное влияние на экономическое развитие как региона, так и страны в целом в связи с [4-6]:

- 1) снижением числа отказов оборудования и качественный мониторинг аварийных ситуаций;
- 2) снижением брака при получении слитков и повышением их качества,
- 3) увеличением срока службы плит кристаллизатора за счет эффективной диагностики их технического состояния;
- 4) удешевлением и ускорением стадии конструкторской разработки при реконструкции существующих кристаллизаторов и создании новых кристаллизаторов МНЛЗ.

Постановка задачи

Анализируя описанные выше исследования, были выявлены следующие проблемы, требующие решения:

- 1) На уровне математического моделирования: рассматривалась одномерная модель, не учитывающая узкие грани кристаллизатора, а также слабо представлены процессы массопереноса при формировании корочки слитка в кристаллизаторе. В частности не рассматриваются процессы ликвации примесей в металле при затвердевании его в кристаллизаторе.
- 2) На уровне организации хранения и обработки данных: большой объем неструктурированных данных, полученных из различных источников и имеющих разные форматы, следовательно, может не существовать единой и полной модели для исследуемого объекта или моделируемого процесса.

Решением данных проблем является внедрение озера данных (Data Lake). Озеро данных может представлять объект в полном объеме на основе информации, полученной из различных систем, которым принадлежат эти данные.

Характер и объем информации значительно изменяются вместе с развитием науки и технологии. Современная аналитика обеспечивает огромное количество новой информации, связанной с тем, что в последнее время принято называть большими данными [7].

Исходя из вышесказанного, для построения концептуальной модели цифрового двойника кристаллизатора МНЛЗ необходимо [8, 9]:

- 1) построить математическую модель кристаллизатора МНЛЗ, отвечающую критериям, описанным выше;
- 2) определить структуру управления комплекса, с учетом специфики и потребностей в области металлургии;
- 3) адаптировать технологию цифровых двойников к данной сфере;
- 4) определить инновационные технологии и подходы к цифровизации в современных условиях.

Данная разработка цифрового двойника обладает следующими преимуществами по сравнению с имеющимися зарубежными и отечественными аналогами:

- 1) большая, чем у аналогичных работ, степень охвата процессов, связанных с кристаллизатором машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и комплексного подхода к ним при построении математической модели;
- 2) использование трехмерной математической модели для расчета теплового состояния слитка;
- 3) применение озера данных в качестве универсального репозитория для последующей уточнения разработанной модели.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Непрерывная разливка стали с использованием машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) позволила исключить из технологического процесса слябинги и блюминги, которые использовались для формирования геометрических размеров заготовки и последующей прокатки ее на листовых и сортовых станах. Разливка стали в изложницы осталась только на территории постсоветского пространства, где нет возможности в осуществлении инновационных проектов.

Около 60% отливается непрерывным литьем заготовка разливается на слябовых МНЛЗ. Получают слябы толщиной от 20–50 мм (тонкослябовые) до 250–400 мм и шириной от 400–500 до 2700–3000 мм. Общая схема литья включает сталеразливочный ковш (стальковш) – промежуточный ковш (промковш) – кристаллизатор для формирования формы слитка – зона вторичного охлаждения.

Являясь основным узлом МНЛЗ, кристаллизатор выполняет следующие функции: отводит тепло разливаемого металла к охладителю (от 10 до 30 % всего имеющегося в нем тепла), формирует на поверхности образующейся заготовки надежную корочку, которая может выдержать ферростатическое давление жидкого металла после выхода из кристаллизатора, обеспечивает форму выходящей заготовки. Продолжительность работы всей разливочной машины зависит от работоспособности кристаллизатора, обеспечивающей его эксплуатационной стойкостью.

Тепловая работа кристаллизатора МНЛЗ во многом определяется гидравлическими процессами в системе его охлаждения. Расход воды в каналах охлаждения, а соответственно скорость воды, определяет интенсивность теплообмена и значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях охлаждающих каналов.

Потери напора, обусловленные большими гидравлическими сопротивлениями в системе охлаждения, равно как и неудачная схема распределения воды по панелям кристаллизатора, могут привести к снижению давления, а

значит, к снижению температуры насыщения (рис. 2) и возникновению нежелательного местного кипения воды от ее давления

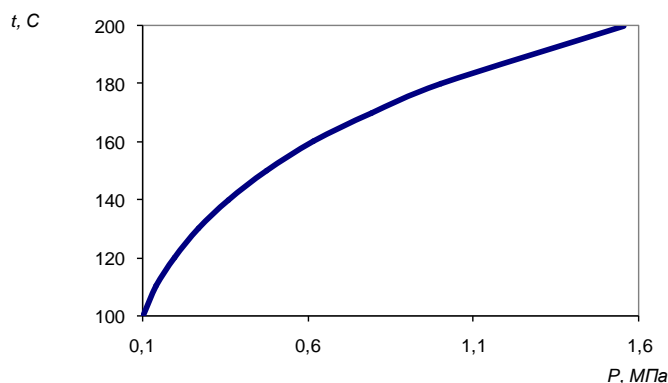


Рис. 2. Зависимость температуры воды на линии насыщения

Для каждой стенки кристаллизатора может применяться как схема прямооточного движения воды в каналах, когда вода подается сверху вниз, т.е. в направлении движения непрерывного слитка, так и схема противоточного движения, когда вода подается снизу-вверх, т.е. в направлении, противоположном движению слитка.

В кристаллизаторе, имеющем цилиндрические или щелевые каналы для охлаждения, актуальными являются определение потерь давления на широких и узких гранях кристаллизатора и знание значений давления и скорости в каждом канале. Важным является также то, как эти показатели зависят от геометрических характеристик каналов и технологических параметров – расхода и выходного (или входного) давления воды [6].

Повсеместная цифровизация экономики, медицины, образования, науки и промышленности подчеркивает важность инноваций и требует новых решений. Технологии цифрового двойника – одна из них. Она становится одним из ключевых направлений развития в области информационных технологий [10].

Цифровой двойник – это виртуальная модель сложных систем (например, технических, природных объектов или процессов) [11].

Достоинством применения технологии цифровых двойников для кристаллизатора МНЛЗ является снижение эксплуатационных расходов; оценка текущих и будущих возможностей системы в течение ее жизненного цикла; раннее выявление недостатков производительности системы путем моделирования результатов еще до разработки физических процессов и продуктов; оптимизация работоспособности, технологичности и устойчивости и непрерывное уточнение конструкции кристаллизатора и его моделей с помощью информации, полученной в реальном времени [12].

Однако данная технология обладает и недостатками, к которым можно отнести необходимость высококвалифицированного кадрового состава, включающего специалистов в области методов и технологий искусственного интеллекта, а также использования суперкомпьютерных технологий и систем сбора, хранения и передачи больших данных [12-16].

В качестве факторов, тормозящих развитие рынка цифровых двойников, следует назвать относительно высокую стоимость проектов данного типа [17].

Интеллектуальные программные системы помогают оптимизировать процессы сбора, хранения и обработки данных с помощью интеллектуального анализа и машинного обучения. Применение этих технологий и алгоритмов приводит к повышению эффективности производственных процессов [18]. Однако выходные файлы разрознены и имеют большой размер, поэтому моделирование и обработка затруднены из-за отсутствия структурированных данных.

При многомасштабном моделировании используются технологии больших систем. Здесь число состояний моделей в разных масштабах комбинаторно велико или неисчислимо, как и взаимосвязи между ними. Также существуют проблемы со сбором, анализом и хранением огромных объемов данных, полученных в результате различных экспериментов и теоретических расчетов.

Большие данные (big data) — очень большое количество неоднородных и быстро попадающих цифровых данных, которые не могут быть обработаны обычными методами. В некоторых случаях в понятие больших данных входит и обработка этих данных [19]. Петабайты необработанных данных генерируются непрерывно, и их необходимо хранить. Задача поиска информации по данным, собранным из разных и независимых источников, для формирования целостного представления о многомасштабных моделях является актуальной.

Цифровой двойник приближает нас к пониманию единой постоянно обновляемой модели, используемой для оптимизации исследовательской работы в области металлургии [20]. Целью использования этой технологии является перенос характеристик производственных объектов и процессов в цифровое пространство с их последующим анализом.

Структурная схема озера данных (рис. 3) иллюстрирует, как извлекаются, загружаются и преобразуются необработанные данные, собранные из различных источников, для обработки и подготовки к анализу.

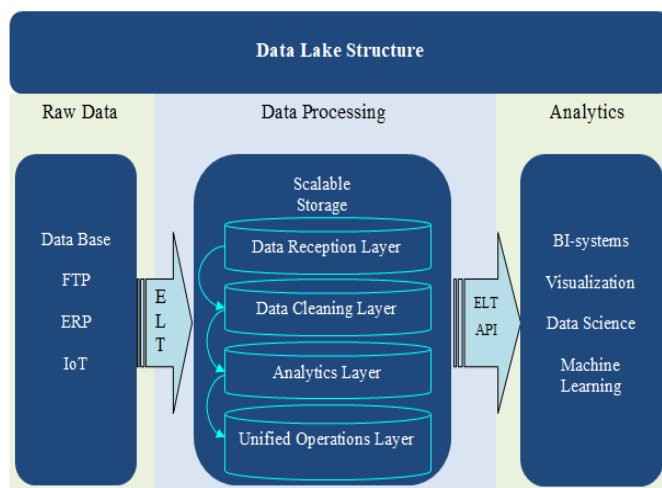


Рис. 3. Структурная схема озера данных

Источником являются данные аналитических приборов кристаллизатора МНЛЗ.

Таким образом, цифровой двойник реализует функции прогнозирования, моделирования и оптимизации процессов поиска, хранения, доступа к существующим структурированным и неструктурированным файлам Озера данных [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработаны математическая модель и обобщенный алгоритм гидравлического расчета медной стенки кристаллизатора МНЛЗ, имеющей произвольное число вертикальных каналов для схемы подвода и отвода воды «с одной» и «с разных сторон». Создана и оптимизирована по быстрдействию компьютерная программа «Кристаллизатор-гидравлика v2» в средах разработки Mathcad и Matlab.

2) Использование компьютерного моделирования позволяет получать перепад давления на стенке кристаллизатора, скорости воды в отдельных каналах и давление в его узлах, зная общий расход или перепада давления воды на кристаллизаторе при произвольной схеме подвода и отвода воды в кристаллизатор.

3) Компьютерное моделирование позволяет выбрать наиболее эффективное с точки зрения скорости воды и гидравлического сопротивления направление подвода и отвода воды, а также оценить возможности прогнозирования аварийных и предаварийных ситуаций, связанных с охлаждением отдельных стенок и всего кристаллизатора по данным промышленной информационно-измерительной системы.

4) Разработанные математическая модель, алгоритм и компьютерная программа могут быть в дальнейшем использованы для создания виртуальной системы мониторинга технического состояния при эксплуатации гидравлической системы кристаллизатора слябовой МНЛЗ-2 «ПАО ММК».

5) Разработана архитектура озера данных для хранения и обработки данных цифрового двойника кристаллизатора слябовой МНЛЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cho S. Effect of Nozzle Port Angle on Transient Flow and Surface Slag Behavior During Continuous Steel-Slab Casting / S. Cho, B.G. Thomas, S. Kim // *Metall Mater.* – 2019. – P. 52-76.

2. Гусев М.П. Результаты опытного тестирования опволоконных измерителей температуры в имитаторе кристаллизатора / М.П. Гусев, К.Н. Анисимов, С.В. Зарубин, А.М. Лонгинов, И.К. Ужинский // *Институт Науки и Технологий, М. Материалы IV Международной научной конференции. (Череповец, 18-20 сентября 2019 г.)*, Череповец, 2019, С. 48-54.

3. Гусев М.П. Концепт цифрового двойника процесса непрерывного литья слитков / М.П. Гусев, К.Н. Анисимов, С.В. Зарубин, А.М. Лонгинов, И.К. Ужинский // *Институт Науки и Технологий, М. Материалы IV Международной научной конференции. (Череповец, 18-20 сентября 2019 г.)*, Череповец, 2019, С. 61-65.

4. Ячиков И.М. Возможности использования математических моделей для теплового контроля дефектов многослойных биметаллических пластин / И.М. Ячиков, Л.Ю. Костылева // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С.53-64.

5. Ячиков И.М. Моделирование тепловых полей в кристаллизаторе с щелевыми каналами охлаждения / И.М. Ячиков, Н.А. Феоктистов, А.С. Савинов, Т.И. Шафиков,

И.В. Михалкина // *ТитМП*. – 2022. – №1(40).

6. Ячиков И.М. Математическое моделирование гидравлических параметров водяного охлаждения медной стенки слябового кристаллизатора МНЛЗ / И.М. Ячиков, В.А. Починская // *Материалы международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа» (г. Уфа, 28 сентября – 1 октября 2022 г.)*. Том 2. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2022. – с. 463-465.

7. Мильман Б.Л. Большие данные в современном химическом анализе / Б.Л. Мильман, И.К. Журкович // *Журнал аналитической химии*. – 2020. – Т.75, № 4. – С. 316-326.

8. Topolsky D. Information Storage and Retrieval System for a Molecular Dynamics Based Digital Twin of Materials / D. Topolsky, A. Belyakov, V. Pochinskaja, I. Topolskaya, N. Yumagulov, D. Fedorov // *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON 2022*. – 2022. – P. 1760-1764.

8. Починская В.А. Применение озера данных для реализации технологии цифровых двойников химических соединений и материалов / В.А. Починская, Д.В. Топольский // *Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022*. – С. 530-535.

9. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

10. Кокорев Д.С. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д.С. Кокорев, А.А. Юрин // *Colloquium-journal*. – 2019. – №10(34).

11. Быкова В.Н. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли / В.Н. Быкова, Е. Ким, М.Р. Гаджалиев, В.О. Мусиенко, А.О. Оруджев, Е.А. Туровская // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2020. – №1(28).

12. Семенов П.В. Концептуальная модель реализации технологии цифровых двойников для предприятий нефтегазового комплекса / П.В. Семенов, Р.П. Семишкур, И.А. Дяченко // *Газовая промышленность*. – 2019. – №7(787).

13. Воробьев А.В. Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников // *Известия Саратовского университета. Математика. Механика. Информатика*. – 2021. – №4.

14. Ottinger N.B. Digital twin: the Age of Aquarius in construction and real estate / N.B. Ottinger et al. – 2021.

15. Xiang F. Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing / F. Xiang et al. // *Procedia Cirp*. – 2019. – Т. 81. – С. 1290-1294.

16. Коровин Г.Б. Возможности применения цифровых двойников в промышленности // *Вестник ЗабГУ*. – 2021. – №8.

17. Зайниддинов О.О. Особенности хранения и обработки больших данных через распределенные файловые системы / О.О. Зайниддинов, А.Р. Ахатов // *Экономика и социум*. – 2023. – №1-1(104).

18. Якивьяк П.Н. Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией / П.Н. Якивьяк, Т.В. Пискажова, А.В. Сальников, П.М. Гофман // *Сибирский аэрокосмический журнал*. – 2022. – №2.

19. Баранов В.Н. Использование цифрового двойника для обучения студентов металлургического профиля / В.Н. Баранов, А.И. Безруких, И.Л. Константинов, Э.А. Рудницкий, Н.С. Солопеко, Ю.В. Байковский // *Высшее образование в России*. – 2022. – №2.

Digital Twin Implementation for Continuous Casting Machine Crystalizer

Pochinskaia V., Topolsky D., Jachikov I., Beliakov A.
South Ural State University (national research university)
Chelyabinsk, Russian Federation

pochinskaiava@susu.ru, topolskiidv@susu.ru, iachikovim@susu.ru, alex.beliakov@susu.ru

Abstract. This article is devoted to the development of a digital twin of the mold of a continuous casting machine. When creating mathematical and computer models of the thermal operation of the copper wall of the mold with cylindrical or slit channels of water cooling, the existing methods of thermal calculation were analyzed. Based on them, algorithms have been developed to determine the temperature differences of the cooling water, the change in the average temperature of the surface of the cooling channels, as well as the temperature of the working wall without coating and with a wear-resistant coating, depending on the rate

of metal casting and the flow of cooling water in the channels. As part of the creation of a digital observer and a virtual monitoring system for the technical condition of the equipment of the slab mold during its operation, mathematical models have been developed to determine the hydraulic and thermal parameters of the copper walls of the mold, the structure of the digital twin and the data lake as a scalable universal repository of heterogeneous and unstructured data.

Keywords: digital twin, data lake, crystallizer, CCM.

Библиографическое описание статьи

Починская В.А. Применение технологии цифровых двойников для кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / В.А. Починская, Д.В. Топольский, И.М. Ячиков, А.Е. Беляков // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т.10, №3. – С. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20230306

Reference to article

Pochinskaia V., Topolsky D., Jachikov I., Beliakov A. Digital twin implementation for continuous casting machine crystalizer, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 29-33. DOI: 10.24892/RIJIE/20230306