



## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

В статье на основе разработанного метода прогнозирования эволюции процессов и систем предложен практический инструмент предиктивной аналитики применительно к техническим наукам, в частности металлургической отрасли при управлении температурным режимом широкополосного стана горячей прокатки. Показан конкретный пример предсказания распределения температуры по длине прокатанной на стане полосы и возможный результат управляющего воздействия.

Предиктивная аналитика, прогнозирование параметров, температура, горячекатаный листовой прокат.

В инженерных отраслях промышленности сегодня востребованы новые технологии, которые позволяют выстраивать сквозные рабочие процессы и контролировать работу машин и агрегатов, а также всего предприятия. Например, известны системы QR-кодирования готовой продукции, создание электронных сертификатов качества, предиктивный анализ инфраструктуры и другие. Востребованы инструменты предиктивной аналитики и в системах предупреждения поломок узлов машин и ремонта.

Модель прогнозирования эволюции процессов и систем описана авторами данной статьи в [1, 2]. Она основана на том, что при изменении какого-либо технологического параметра состояния во времени, процесс можно рассматривать как эволюционный, поэтому можно воспользоваться второй производной по времени этого параметра для визуализации «энергетического» смысла процесса, когда она становится «аналогом энергии», и по ее изменению и поведению можно видеть направление развития системы – прогресс, деградацию, рост, устойчивость и т.д. Например, известно, что если дважды проинтегрировать по времени график пройденного пути, то получим график изменения ускорения. Сопоставление их друг с другом хорошо отражает взаимосвязь: если

кривая пути растет круто вверх, то на графике ускорения отражается скачок второй производной, а это значит, что в систему поступила энергия. Прогнозируя поведение энергии, можно, забегая вперед, наблюдать будущее параметра, то есть предсказывать значение параметра, в чем и состоит смысл предиктивной аналитики.

На рисунке 1 показана принципиальная схема математической обработки сигнала или параметра для получения его будущего значения.

Данная модель прогнозирования обладает свойством давать упреждающие сигналы для управления процессом в нужном технологическом режиме, что и является необходимым свойством инструментов предиктивной аналитики.

Опишем работу предлагаемой модели предиктивной аналитики на примере широкополосного стана горячей прокатки, технологическая схема которого показана на рисунке 2. На стане контролируется, например, температура металла на выходе из печи  $\sim 1150$  °С, температура начала горячей деформации в черновых клетях  $\sim 1000$  °С, температура конца горячей деформации в чистовых клетях  $\sim 900$  °С и температура смотки в рулон  $\sim 450$  °С.

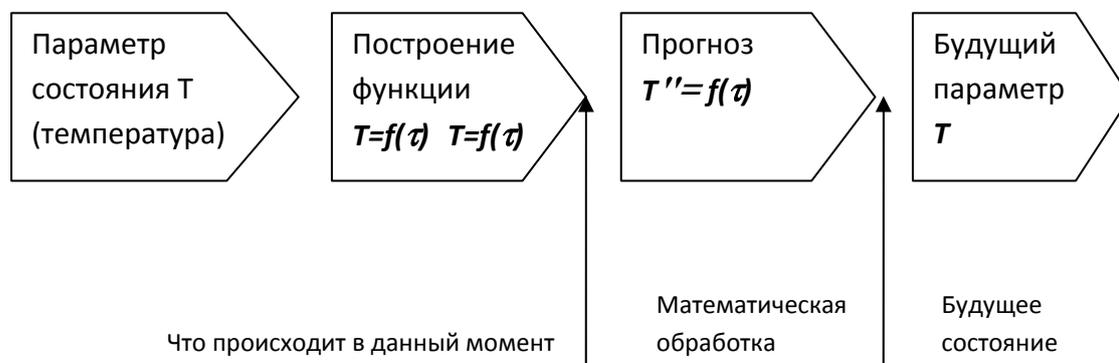


Рис. 1. Принципиальная схема работы инструмента предиктивной аналитики

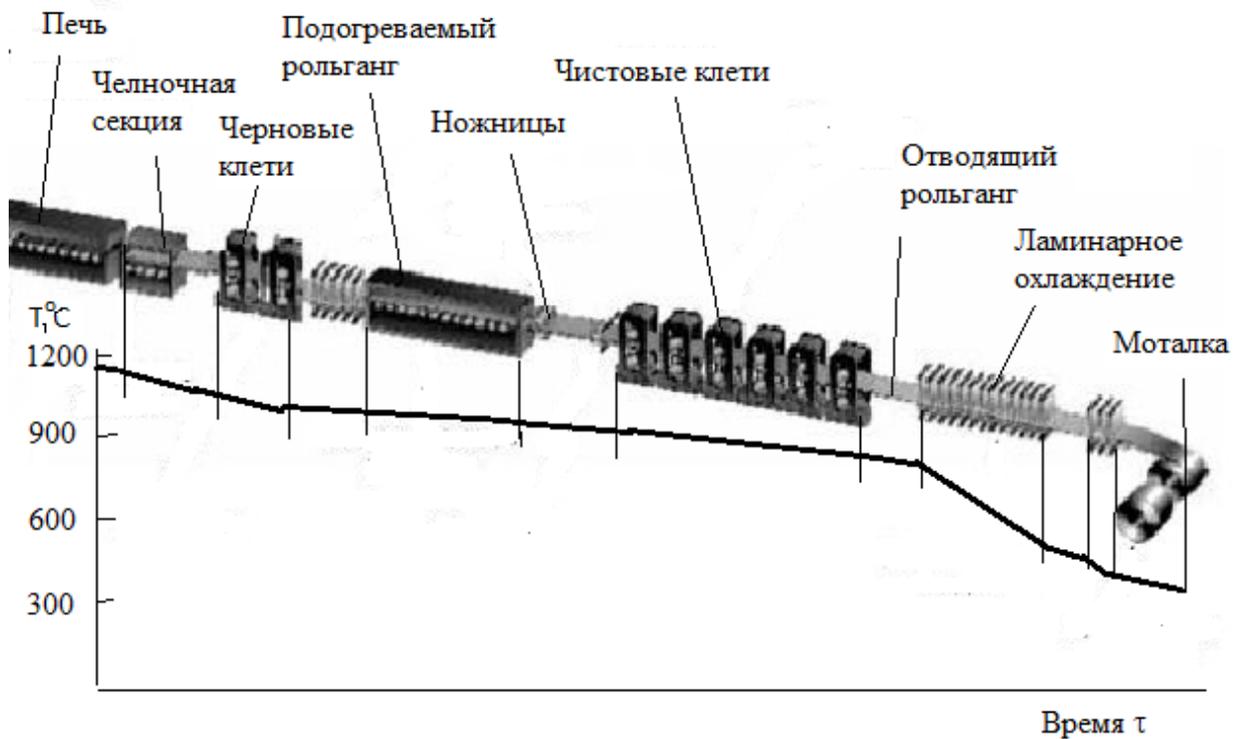


Рис. 2. Технологическая схема широкополосного стана горячей прокатки и примерный температурный режим обработки металла

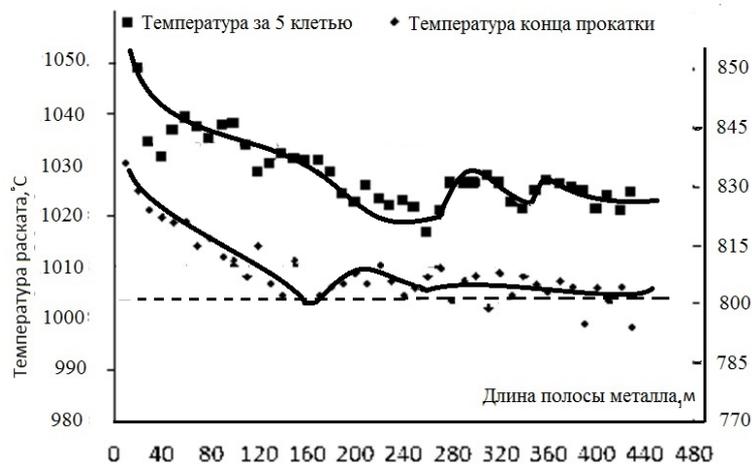


Рис. 3. Распределение по длине полосы температуры металла после черновой клетки и в конце прокатки. Точками показаны фактически замеренные температуры, линиями – результаты предиктивной аналитики

Определяющими здесь являются не только температуры, но и скорости охлаждения на отдельных участках стана, которые формируют микроструктуру стали и механические характеристики готовой продукции [3]. Одними из наиболее технологически значимых являются температура конца прокатки (конца горячей деформации) после последней клетки и температура смотки – именно они определяют свойства готовой продукции, так как задают скорость охлаждения на отводящем рольганге.

Математическая модель предиктивной аналитики включает в себя последовательность фактических (измеренных) температур металла на выходе из печи, перед первой клетью, перед второй клетью, затем мо-

дель с учетом технологических параметров (степени обжатий, интенсивности охлаждения в межклетевых промежутках и на отводящем рольганге) прогнозирует температуру конца прокатки и смотки.

Покажем это на конкретном примере. На рисунке 3 представлен температурный режим горячей прокатки на выходе металла из черновой (за 5-й клетью) и чистой (за 12-ой клетью) группы, показывающей температуру конца прокатки. По горизонтальной оси показана длина прокатываемой полосы. Данные взяты из работы [4].

Исходными данными для расчетов является ряд численных значений, получаемых путем замеров температуры за 5-й черновой клетью. Математическая

обработка заключается в формировании числового ряда первой и второй производной и ее прогнозе на шаг вперед, процесс получения которых подробно описан в [2]. Путем такой последовательности аналитических расчетов можно на стадии прохождения уже первых десятков метров полосы по окончании прокатки после чистовой клетки иметь предсказанные значения температур для всей остальной длины полосы. В случае несоответствия фактических температур режимным значениям, необходимо предпринять ускорение или замедление прокатки, изменение условий охлаждения металла душирующими устройствами или термостатирование металла тепловыми экранами.

На рисунке 3 точками показаны фактические значения температур, а кривыми линиями – результаты математического прогноза методом предиктивной аналитики, другими словами, кривые – это знания, опережающие факт.

На рисунке хорошо видно, что после 5-й черновой клетки различие температур по длине полосы может достигать тридцати градусов, особенно в сравнении переднего и заднего конца полосы. После чистовой прокатки эта неравномерность сохраняется практически с тем же разбросом значений. Однако на промежуточном между черновыми и чистовыми клетями рольганге эту неравномерность можно уменьшить путем регулируемого охлаждения или подогрева на участках, координаты которых уже известны. Например, на участке  $240 \pm 20$  м, там, где провал температуры, требуется термостатирование, а на участке  $290 \pm 10$  м – охлаждение душирующими устройствами.

В результате на выходе из чистовой клетки неравномерность температур может быть устранена, что в идеальном случае может принять вид прямой линии температур вдоль полосы, как показано на рисунке 3 пунктирной линией.

Таким образом, предиктивная модель должна не просто пассивно следить и прогнозировать какой-либо технологический параметр, но давать управ-

ляющие команды на регулирование интенсивности средств охлаждения, например длину участка охлаждения на отводящем рольганге для обеспечения необходимой скорости охлаждения, что обеспечивает повышение качества готовой продукции. Предиктивная аналитика в данном примере представляет собой средство управления.

Описанный инструмент предиктивной аналитики является универсальным средством, поэтому может быть использован для многих технологических процессов.

### Литература

1. Щекин, С. М. Прогнозирование эволюции системы по флуктуациям параметров / С. М. Щекин // Вузовская наука – региону : материалы второй всероссийской научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2004. – С. 106–109.
2. Щекин, С. М. Прогнозирование развития систем для выработки управленческих решений / С. М. Щекин, М. М. Никифорова // Вестник ВоГУ. Серия технические науки. – 2019. – № 2 (4). – С. 56–60.
3. Генкин, А. Л. Оптимизация температурно-скоростного режима горячей прокатки полос: модели. методы, системы : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Генкин Аркадий Львович ; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва, 2009. – 46 с.
4. Татару, А. С. Исследование и разработка технологии производства горячекатанного высокопрочного автолитового проката из двухфазных ферритомартенситных сталей с заданными показателями механических свойств : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Татару Александр Сергеевич. – Москва : НИТУ МИСиС, 2018. – 278 с.

*S.M. Shchekin, M.M. Nikiforova*  
*Vologda State University*

### DEVELOPMENT OF PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS IN METALLURGY BASED ON A MODEL FOR PREDICTING THE EVOLUTION OF PROCESSES AND SYSTEMS

Basing on the developed method for predicting the evolution of processes and systems, the article offers a practical tool for predictive analytics in relation to technical sciences, in particular, for the metallurgical industry in managing the temperature regime of a hot rolling mill. A specific example of predicting the temperature distribution along the length of a strip rolled on a mill is shown.

Predictive analytics, parameters forecasting, temperature, hot-rolled flat stock.