

УДК 669.046.55

О.Н. Кукушкин, С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОВШОВОГО ВАКУУМИРОВАНИЯ

В настоящее время внепечная вакуумная обработка стали продолжает развиваться как во всем мире, так и в Украине. К наиболее перспективным способам вакуумирования с точки зрения экономичности и эффективности удаления неметаллических включений относится вакуумирование жидкой стали в ковше с продувкой инертным газом. За последние 10 лет на металлургических предприятиях Украины установлены три вакууматора камерного типа. В соответствии с Государственной программой развития горно-металлургического комплекса Украины до 2010г. планируется установка комплексов вакуумной обработки стали на целом ряде предприятий [1].

Создание предпосылок для применения автоматизированной системы управления процессом ковшового вакуумирования стали требует обеспечения непрерывного контроля уровня металла в ковше с целью предотвращения выплесков, прогнозирования изменения температуры стали во время внепечной обработки и концентрации растворенного водорода в ходе вакуумирования на основе создания адекватных математических моделей процесса.

С целью экономии энергетических ресурсов необходимо провести подготовку стали к вакуумированию за минимально возможное время с минимальными тепловыми потерями и закончить сам процесс вакуумирования до достижения заданной температуры. Таким образом температура расплава является фактором, ограничивающим длительность вакуумирования. Минимальная длительность вакуумной обработки определяется требуемым содержанием в стали растворенных неметаллических включений и газов (в частности, водорода, концентрация которого в расплаве после вакуумирования не должна превышать  $2 \cdot 10^{-4} \%$  [2]). Сократить необходимое для получения заданной концентрации водорода время вакуумной обработки можно только интенсифицировав продувку стали инертным газом, одновременно гарантируя отсутствие выплесков расплава из ковша.

Основное ограничение технологии внепечной обработки стали в ковшах – обеспечение температуры стали перед разливкой в заданном диапазоне. В результате анализа и обработки данных натурных исследований, проведенных на вакууматоре сталеразливочных ковшей ОАО «Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (НТЗ), авторами получены математические модели для прогноза изменения температуры расплава при подготовке к вакуумированию первого и второго ковшей в зависимости от

массы и начальной температуры налитой в них стали, а также от температуры футеровки ковшей перед выпуском [3].

Для комплексной оценки длительности различных операций и теплового баланса при их выполнении нами разработана событийно-имитационная модель функционирования всего участка, реализованная в пакете STATEFLOW [4]. Для адаптации модели к конкретным производственным условиям используются результаты измерения температуры расплава в ковше по окончании выпуска, перед началом и по окончании обработки на установке «ковш-печь», перед началом и по окончании вакуумирования, которые проводятся в соответствии с используемой технологией внепечной обработки на НТЗ.

Прогнозирование температуры в ходе внепечной обработки сократит технологические паузы, связанные с проведением замеров температуры расплава, что ускорит его нагрев на установке «ковш-печь». Это позволит снизить затраты энергоресурсов и расход блоков термоэлектрических преобразователей.

Рассмотрим основные стадии процесса вакуумирования с точки зрения обеспечения качества процесса.

**Набор вакуума.** Скорость набора вакуума ограничена сверху интенсивным выделением растворенных газов даже при незначительном перемешивании (расход аргона на продувку 20...40 л/мин). При высокой скорости набора вакуума уровень ванны резко поднимается, это инициирует выплески расплава на защитный экран вакуумной камеры, что может привести к его свариванию с обечайкой ковша. Как показало моделирование [5], избежать чрезмерно активного удаления газов можно при наборе рабочего значения вакуума (3 гПа) за 9...12 мин, что особенно важно для ковшей с малым запасом высоты ковша (массой жидкой стали до 120 т). Это соответствует сложившейся на предприятии технологии.

Резерв сокращения времени набора вакуума, который важен для снижения общего времени выдержки ковша в вакуум-камере и связанных с этим тепловых потерь, может быть использован при организации автоматического контроля за уровнем ванны. Эту задачу, как показал положительный опыт реализации нашей разработки [6], целесообразно решать с помощью радиолокационных измерительных систем уровня. При этом особенно эффективно (на 1...2 мин) можно сократить длительность набора вакуума для ковшей с уменьшенным наливом и большим запасом высоты ковша. Тем более, для них особенно важно снижение тепловых потерь расплавом.

**Рабочий режим вакуумирования.** Основным режимным параметром является расход аргона на продувку ванны. Минимальная величина расхода определяется необходимостью организации полного перемешивания в ковше и, по нашим данным, это время не превышает 2 мин при минимальном расходе аргона на продувку. Увеличивать расход аргона необходимо при достижении рабочего разрежения в вакуум-камере

значения 3 гПа, после уменьшения колебаний поверхности, вызванных выделением растворенных в расплаве газов. Иначе на поверхности ванны возникнут волны, дополнительно возбуждаемые выходящими пузырями инертного газа, что может привести к выплескам расплава.

В настоящее время операторы вакуумной установки изменяют расход аргона ступенями в диапазоне от 20 до 200 л/мин, основываясь на своем опыте управления процессом вакуумирования. В принципе, можно оптимизировать переключение ступеней расхода аргона как во времени, так и по величине программным путем. Однако в реальных условиях, когда ковши имеют различное наполнение и, кроме того, невозможно лимитировать количество вводимых добавок, программное управление процессом нерационально. На этом этапе задача автоматизации управления расходом аргона может быть решена только с использованием информации о текущем уровне ванны. При этом целесообразно не стабилизировать уровень ванны на какой-то заданной величине запаса высоты ковша, а совместно использовать информацию как о средней величине уровня, так и о его высокочастотных колебаниях, вызванных барботажем и волнением поверхности. Предлагается осуществить компьютерную обработку сигнала о текущем уровне расплава в ковше, выделить его среднее значение и отдельно – амплитуду колебаний поверхности расплава. Далее целесообразно оператору установки ковшового вакуумирования индицировать на мониторе график изменения во времени среднего значения уровня с наложенным диапазоном колебаний. Пример представления данной информации приведен на рисунке.

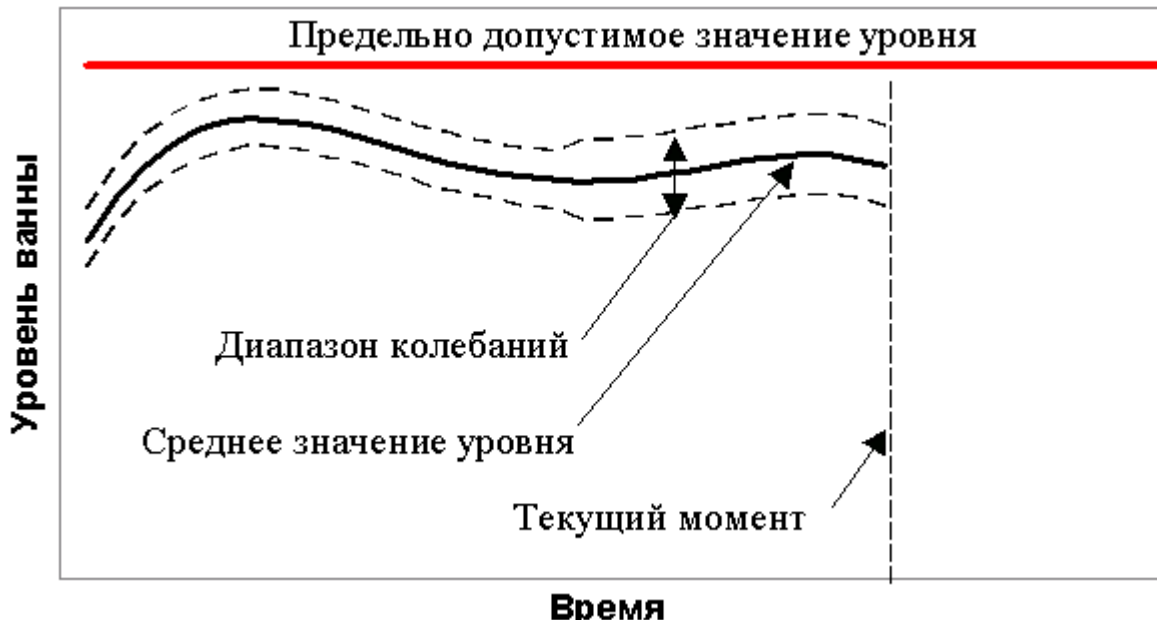


Рисунок – График изменения во времени среднего значения уровня с наложенным диапазоном колебаний

Тревожным сигналом для оператора является приближение верхней границы диапазона колебаний к предельно допустимому значению.

Индикация амплитуды высокочастотных колебаний дает оператору дополнительную информацию об интенсивности перемешивания ванны и ее дегазации. Такой алгоритм управления позволяет в каждый момент времени реализовать максимально возможный расход аргона, что обеспечит наиболее интенсивное удаление из расплава растворенного в нем водорода.

При предлагаемом способе управления расходом аргона возникает дополнительный положительный эффект. Поскольку оператор (или автоматическая система) будет увеличивать расход аргона таким образом, чтобы верхняя граница диапазона колебаний расплава приближалась к предельному значению уровня, то уровень ванны в ходе вакуумирования будет изменяться в более широких пределах, что будет способствовать уменьшению износа шлакового пояса футеровки ковша.

**Остановка процесса.** Для определения момента остановки процесса вакуумирования следует использовать модель прогноза изменения концентрации водорода по ходу вакуумной обработки стали [7]. Входной величиной данной модели является начальная концентрация растворенного водорода, которая измеряется непосредственно перед вакуумированием с помощью системы Hydris. Если такая информация отсутствует, то длительность процесса вакуумной обработки первого ковша плавки необходимо выбирать с некоторым запасом, ориентируясь на максимально возможную в данных условиях концентрацию водорода в расплаве, а время обработки второго ковша той же плавки скорректировать по результатам химического анализа обработанного первого ковша.

В результате анализа экспериментальной информации установлено, что 3 % ковшей по окончании внепечной обработки имели температуру металла ниже требуемой. В этих ситуациях ковш дополнительно перед разливкой подогревали. Также установлено, что после обработки около 17 % ковшей температура металла в них была выше требуемой. В этих ситуациях увеличивали продолжительность очистительной продувки после вакуумирования до достижения расплавом требуемой температуры.

Согласно данным промышленных экспериментов, приблизительно 75 % ковшей после вакуумной обработки имели концентрацию водорода менее  $1,6 \cdot 10^{-4} \%$ . В результате математического моделирования установлено, что в среднем для таких ковшей время вакуумной обработки можно сократить приблизительно на 10 %. При невозможности определения содержания водорода в расплаве перед вакуумированием, прогнозирование удаления водорода в зависимости от предполагаемого режима обработки позволит экономить до 4 % времени на вакуумировании вторых ковшей с учетом результатов обработки первых ковшей.

На основании проведенных авторами экспериментальных и теоретических исследований особенностей процесса вакуумирования сталеплавильных ковшей определены задачи автоматизации участка внепечной обработки стали, сформулированы технологические требования к