ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Том 62. № 5. С. 353 – 359.
© 2019. *Еременко Ю.И., Полещенко Д.А.*

УДК 681.5+622.3

О РАЗРАБОТКЕ И ПРОМЫШЛЕННОЙ АПРОБАЦИИ СИСТЕМЫ ОТСЕЧКИ ШЛАКА ПРИ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Еременко Ю.И., *д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные и информационные системы управления»*

Полещенко Д.А., *к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные и информационные системы управления»* (po-dima@yandex.ru)

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС
(309516, Россия, Белгородская область, Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. В работе произведен анализ существующих подходов решения задачи определения момента начала истечения шлака при сливе жидкого металла из сталеразливочного ковша в промежуточный. Решение данной задачи рассматривалось в двух аспектах: первый – это выбор наилучшего способа формирования диагностического сигнала с позиции соотношения цена/качество обработки и второй – разработка метода обработки данного сигнала с целью выделения полезной информации. Для этого на основании аналитического анализа предложена схема съема сигнала виброускорения с установки, а именно с манипулятора защитной трубы сталеразливочного ковша. Для монтажа акселерометра на манипуляторе разработан образец изделия. В нем предусмотрена защита от влияния на датчик промышленных возмущений. Для анализа сигнала виброускорения выработаны критерии определения начала истечения шлака, основанные на расчете энергии энтропии. Данный подход и разработанная на базе него система апробированы в промышленных условиях на реальном объекте. Единственным условием для эффективной работы выработанных критериев являлся перевод на заключительном этапе разливки подсистемы поддержания уровня стали в промежуточном ковше в ручной режим для исключения создания возмущений от движения шиберного затвора, управляющего потоком жидкой стали. По результатам экспериментов в реальных условиях выявлено, что отключение автоматики необходимо производить при остаточном весе содержимого сталеразливочного ковша порядка 18 – 19 т до окончания разливки. В данном режиме работы оператору всегда удавалось подобрать такую скорость слива металла, чтобы уровень стали в промежуточном ковше находился в рамках технологического регламента. В результате удалось обеспечить срабатывание алгоритма для каждой разливки ранее, чем это сделал оператор. При этом остаток стали со шлаком в сталеразливочном ковше не превышал 3,8 т относительно момента отсечки шлака оператором.

Ключевые слова: металлургическая отрасль, сталеразливочный ковш, отсечка шлака, энергия энтропии, виброускорение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-5-353-359

Введение

Этап слива металла является важным технологическим процессом в металлургической отрасли, сильно влияющим на качество готового изделия. Его суть состоит в том, чтобы обеспечить постоянное наличие металла в ванне промежуточного ковша, достаточного для обеспечения потребностей машины непрерывного литья заготовок. Объект исследования, представленный на рис. 1, состоит из двух емкостей – сталеразливочного (*1*) и промежуточного (*2*) ковша. Следует отметить, что по технологии на поверхности жидкой стали плавает слой шлака (*3*) высотой порядка 20 см. Слив стали из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется через защитную трубу (*4*), которая прижимается к выпускному отверстию шибера сталеразливочного ковша (*5*) манипулятором защитной трубы (*9*).

В системе сталеразливочный ковш/промежуточный ковш в плане автоматизации присутствуют две задачи, которые обеспечивают качество разливки. Первая – это поддержание уровня стали на определенном значении в промежуточном ковше путем дросселирования ши-

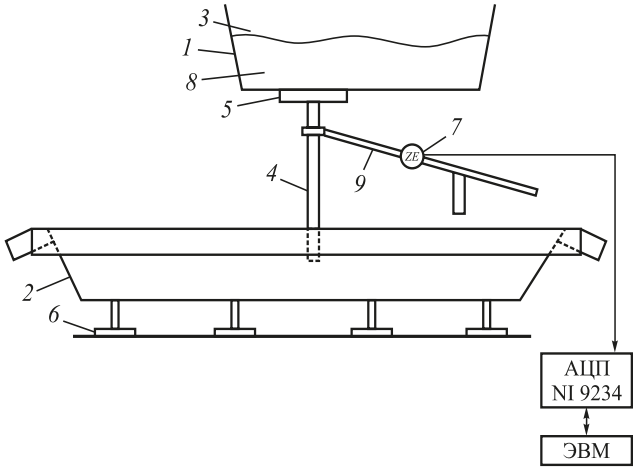

Рис. 1. Функциональная схема исследуемой системы:
1 – сталеразливочный ковш; *2* – промежуточный ковш; *3* – шлак; *4* – защитная труба; *5* – шибер сталеразливочного ковша; *6* – шибер промежуточного ковша; *7* – акселерометр; *8* – сталь; *9* – манипулятор

Fig. 1. Functional scheme of system under investigation:
1 – ladle; *2* – tundish; *3* – slag; *4* – protective pipe; *5* – slide shutter of the ladle; *6* – slide shutter of the tundish; *7* – sensor (accelerometer); *8* – molten steel; *9* – manipulator

бера сталеразливочного ковша. Вторая заключается в управлении моментом закрытия шибера сталеразливочного ковша с целью отсечки шлака.

В данной работе разрабатывается метод для решения второй задачи. При сливе жидкого металла из сталеразливочного ковша важным процессом, влияющим на качество стали, является предотвращение попадания шлака в промежуточный ковш. Поскольку при попадании шлака в промежуточный ковш нарушается верхняя «корка» шлака, которая защищает металл от окисления и охлаждения, существует вероятность попадания шлака в литую заготовку, что может привести к браку готового изделия.

На сегодняшний день на большинстве металлургических предприятий России управление отсечкой шлака производится в ручном режиме. При этом оператор отсекает шлак, когда происходит характерное свечение, сопровождающее разрыв защитной шлаковой корки промежуточного ковша. Негативным аспектом данного подхода является то, что определенный объем шлака гарантированно попадает в промежуточный ковш. Для более важных марок сталей применяют гравиметрический метод, который исключает попадание шлака, что приводит к излишним потерям металла в брак. Таким образом, решаемая в работе задача является достаточно актуальной в виду существенных потерь, которые несут металлургические комбинаты при разливке стали на данном технологическом переделе.

Теоретическая часть

Существует ряд подходов к определению момента истечения шлака. Одним из них является подход с использованием автоматического манипулятора на основании специального поплавка. Достоинством данной технологии является его дешевизна и простота реализации [1, 2]. Однако для рассматриваемой системы данная технология не может быть применена, так как она разработана только для слива металла из конвертора. Во время слива металла выполняется наклон конвертора, что позволяет занести поплавок точно над сталевыпускным отверстием [3]. Другой подход использует анализ излучения, исходящего от стали в инфракрасном диапазоне частот. Для рассматриваемого объекта данная технология не может быть применена, так как она рассчитана на непосредственный контроль только открытого потока металла камерой, чего нет в данной технологии [4, 5]. Определять момент истечения шлака возможно путем оценки изменения параметров поля, которые фиксируются измерительной обмоткой, установленной вокруг сливного отверстия сталеразливочного ковша [6]. Существенным недостатком данной технологии является отсутствие универсальности [7]. Электромагнитную катушку необходимо монтировать в каждый сталеразливочный ковш, защищать футеровкой от повышенной температуры или применять специальные жаропрочные материалы. При смене футеровки на сталеразливочном ковше необходима и замена катушек. Также недостатком данного подхода являются значительные эксплуатационные расходы. Еще один подход основывается на анализе сигнала вибрации отдельных объектов исследуемой системы и имеет ряд преимуществ перед остальными методами [8 – 13]. Во-первых, он применим для рассматриваемой системы при сливе жидкого металла через защитную трубу. Во-вторых, имеет возможность раннего обнаружения шлака на подходе к сливному шиберу. В-третьих, не требует дорогостоящих вложений и конструирования дополнительных устройств для получения сигнала. Однако сложностью применения данного подхода является проблема обработки информации, связанная с обнаружением различия в вибрации при истечении стали и шлака.

На основании проведенного анализа различных подходов к источнику сигнала, с помощью которого возможно определять момент начала истечения шлака, наиболее целесообразным с позиции цена/качество обработки является использование вибрационного сигнала.

В работе [14] авторы также приходят к выводу, что вибрационный метод является наиболее информативным и простым с точки зрения конструктивной реализации относительно других методов обнаружения момента истечения шлака.

В работе [15] приведены результаты экспериментов амплитудного анализа во времени сигнала виброускорения манипулятора, которые говорят о приемлемых показателях по фиксации момента отсечки. Однако нужно иметь ввиду, что работа шибера сталеразливочного ковша идет в условиях стабилизации уровня стали в промежуточном ковше. Это нужно для обеспечения требуемого качества слитка, формируемого кристаллизатором. Соответственно шибер постоянно приоткрывается/призакрывается, что вносит возмущения, значительно превосходящие по амплитуде сигнал вибрации, создаваемый истечением стали. Из работы [15] не ясно, учитывали ли авторы данное обстоятельство при оценке результатов.

Для решения этой проблемы предлагается анализировать совместно спектральную плотность мощности и дискретное вейвлет-разложение сигнала виброускорения манипулятора защитной трубы [16]. Выделяются наиболее информативные диапазоны в частотной области и диапазоны коэффициентов вейвлет преобразования. Отмечается, что результаты обоих подходов коррелируют между собой и это является показателем эффективности. Однако авторы данной работы судят о результате не по серии, а по одному эксперименту. Дело в том, что спектры сигналов, как показывает опыт [17, 18], от плавки к плавке могут существенно отличаться даже для одной марки стали при одинаковых скоростях разливки. Это приводит к тому, что области,

информативные для одной плавки, непоказательны для другой.

В данной работе предлагается снимать сигнал виброускорения с манипулятора защитной трубы с помощью акселерометра и на базе него разработать метод для определения момента начала истечения шлака из сталеразливочного в промежуточный ковш. Схема расположения оборудования приведена на рис. 1.

Конструкция изделия для съема данных

По результатам предыдущих исследований [18] было установлено, что на систему измерения виброускорения манипулятора защитной трубы существенное влияние оказывает шум цеха (механические удары, работающие привода, проезжающие краны и др.).

С этой целью датчики, закрепляемые до этого на манипуляторе с помощью магнита, были жестко прикреплены на прямоугольный отрез листовой стали путем специальной шпильки с резьбовым крепежом (рис. 2, *а*). Также проводные соединения, соприкасающиеся со стальным основанием, были теплоизолированы асбестовой нитью. Над датчиками был установлен металлический кожух, внутри которого проложено два слоя войлока.

Сигнал с датчиков (рис. 2, *б*) заводился в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), находящемся непосредственно рядом в специальном защитном коробе. Сигнал в оцифрованном виде по интерфейсу Ethernet передавался на рабочую станцию, где производилась его обработка.

Предлагаемый алгоритм

После проведения ряда экспериментов было замечено, что перед отсечкой шлака, ориентировочно за время до 3 с, происходит заметное снижение уровня сигнала виброускорения (рис. 3, *а*). Так же, исходя из предыдущих исследований [18 – 20] применения амплитудного, спектрального, вейвлет и нейросетевого анализа было определено, что в условиях помех для различных разливок можно успешно выделить частоту или диапазон частот, где снижается амплитуда исследуемого сигнала. Однако обобщающего решения для всех разливок обнаружить не удалось.

В связи с этим, была сформулирована следующая гипотеза: если уровень сигнала суммарно с уровнем общего шума снижается, то это должно отражаться на изменении энтропии сигнала виброускорения. Энтропия в теории информации – это мера неопределенности системы, в данном случае сигнала виброускорения поверхности манипулятора защитной трубы. Для анализа была использована функция энергии сигнала энтропии, выраженная зависимостью

$$E = \sum_{i=1}^{n} \ln\left[x_t^2(i) \right],$$

где x_t – вектор параметров виброускорения, соответствующий измерению АЦП, которое производится с дискретностью 0,58 с; $n = 30\,000$ – число точек в одном измерении, производимого с частотой съема 30 кГц; t – номер измерения в реальном масштабе времени.

Изменение энергии энтропии сигнала виброускорения (ЭЭСВ) на примере одной из разливок показано на рис. 3, *б*.

В результате анализа было сформировано три критерия.

Первый критерий – составной, заключающийся в одновременном выполнении следующих условий: если разница предыдущего и текущего значения ЭЭСВ меньше 2900 (определено эмпирическим путем) и число значений ЭЭСВ, меньших среднего значения ЭЭСВ, следующих друг за другом за ширину окна анализа

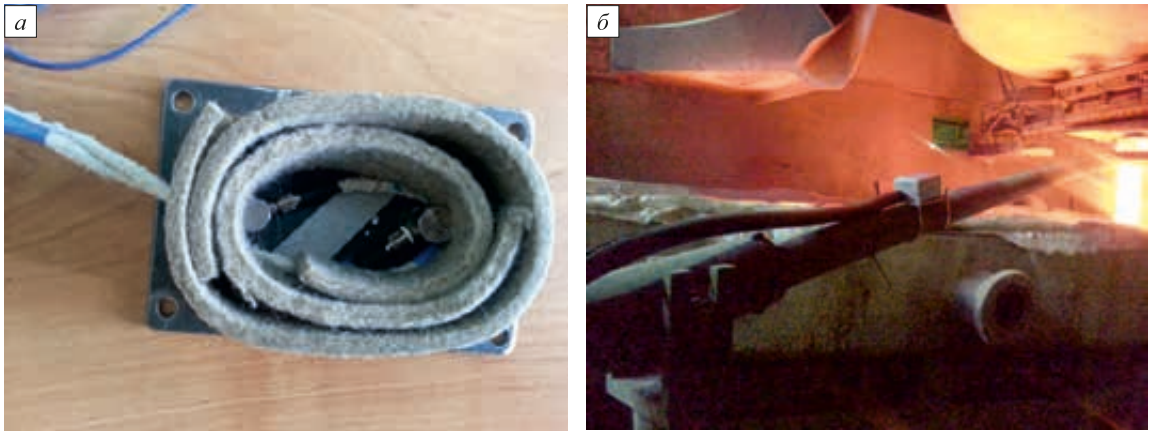

Рис. 2. Конструктив для съема данных:
а – изделие для монтажа датчика; *б* – съем данных с объекта

Fig. 2. Construct for data measurement:
а – product for sensor mounting; *б* – data measurement from the object

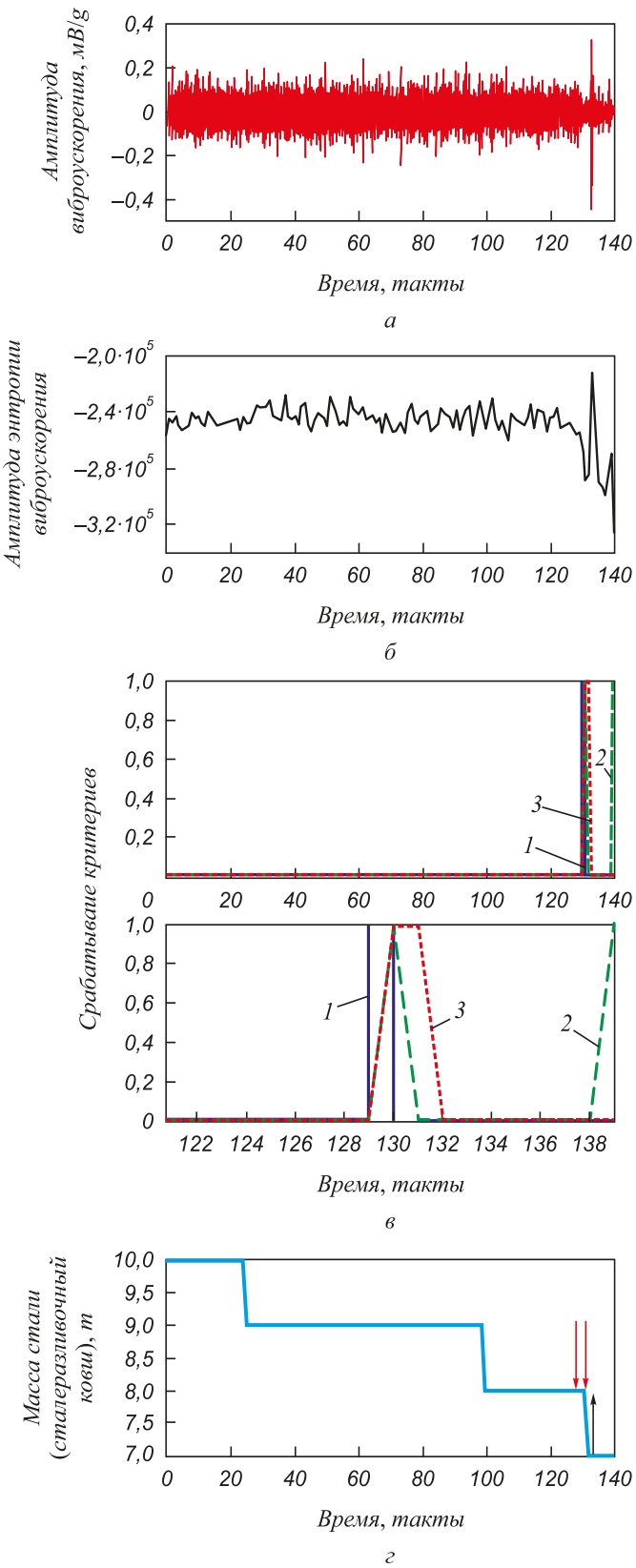

Рис. 3. Графики анализа сигнала:
а – сигнал виброускорения; *б* – сигнал ЭЭСВ; *в* – срабатывание критериев *1*, *2* и *3*; *г* – вес стали в сталеразливочном ковше

Fig. 3. Graphs of signal analysis:
а – vibration acceleration signal; *б* – energy of vibration acceleration signal entropy; *в* – criteria triggering *1*, *2* and *3*; *г* – weight of steel in the ladle

больше или равно 5, то устанавливается сигнализирующий бит наличия шлака. Второй критерий заключается в том, что для установленной ширины окна анализа в 10 тактов проверяется количество минимумов относительно момента, когда текущее значение ЭЭСВ становится меньше среднего значения ЭЭСВ и держится там подряд более 8 тактов. При достижении порога в 3 состоявшихся минимума устанавливается сигнализирующий бит наличия шлака. Третий критерий заключается в том, что, если мгновенное значение ЭЭСВ становится менее 15 000 единиц, то устанавливается сигнализирующий бит наличия шлака.

Результаты промышленной апробации системы

Апробация системы определения наличия шлака производилась как на данных нормальной эксплуатации *1 – 11* разливки, представленных в таблице, так и на встроенной в реальное производство системе, которая смогла справиться с поставленной задачей с результатами, представленными для *12 – 15* разливки.

Первоначальная масса металла со шлаком в ковше для каждой разливки составляла порядка 150 т. Шлак из ковша, в силу различных факторов, таких, например, как марка стали, высота слоя шлака, угол наклона к горизонту ковша и других, влияние которых сложно формализовать, начинал выходить, как показано в таблице, при различной остаточной массе в ковше от 2,8 т (*13* плавка) до 12 т (*7* плавка). При работе на объекте наблюдались случаи выхода шлака, начиная с 17 т массы остатка в ковше. Данное обстоятельство не позволяет упростить систему, сделав алгоритм отсечки шлака по массе остатка в сталеразливочном ковше.

В каждом эксперименте соблюдалось условие, что оператор настраивал систему на стабильное поддержание уровня металла в промежуточном ковше в соответствии со скоростью разливки. После этого переводил систему в ручной режим управления и по возможности старался не вмешиваться в процесс изменением положения шибера, начиная с уровня остатка в ковше, равного 18 т. Это сделано, ввиду вносимых помех движениями шибера сталеразливочного ковша, связанных как со скачкообразным изменением уровня вибрации, так и с изменением среднего уровня вибрации из-за изменения скорости истечения стали.

На рис. 3, *в* приводится результат апробации системы диагностирования для первой разливки. Из таблицы видно, что контролируемый сигнал начинает снижаться с 122 такта и на 129 такте (8,6 т) срабатывает первый критерий, на 130 такте (масса остатка в сталеразливочном ковше 8,6 т) второй и третий. Отсечка шлака оператором производится на 132 такте (8,5 т). Таким образом, система предложила произвести отсечку шлака за три такта ранее, чем оператор. При этом объем стали со шлаком, поступивший в промежуточный ковш, сократился бы на 0,1 т.

Результаты апробации системы

Results of the system approbation

Номер разливки	Срабатывание критерия, такт/тонна			Отсечка шлака, такт	Отклонение по критерию, такт/тонна		
	1	*2*	*3*		*1*	*2*	*3*
1	21/9,5	22/9,5	–	31/9,2	10/0,3	9/0,3	–
2	129/8,6	130/8,6	–	132/8,5	3/0,1	2/0,1	–
3	45/9,3	–	–	47/9,2	2/0,1	–	–
4	–	39/7,3	–	47/7,2	–	8/0,1	–
5	86/5,2	–	86/5,2	89/5,1	3/0,1	–	3/0,1
6	114/2,9	–	114/2,9	115/2,8	1/0,1	–	1/0,1
7	83/12,1	89/12,1	–	91/12	8/0,1	2/0,1	–
8	296/6,6	–	–	297/6,5	1/0,1	–	–
9	37/10,9	36/10,9	38/10,9	59/10,5	22/0,4	23/0,4	21/0,4
10	394/6,8	333/8,1	–	395/6,7	1/0,1	62/1,4	–
11	–	291/12	–	295/11,9	–	4/0,1	–
12	80/11,4	–	–	84/11,3	4/0,1	–	–
13	238/4,5	126/6,5	–	340/2,8	102/1,7	214/3,7	–
14	428/5,5	386/6,1	–	455/4,9	27/0,6	69/1,2	–
15	–	203/14,6	54/17	415/10,8	–	212/3,8	361/6,2

Выводы

На основании данных промышленных испытаний, сведенных в таблицу, можно резюмировать, что остаточный слив металла со шлаком из сталеразливочного ковша для обеспечения бесшлаковой разливки составляет не более 0,5 т с вероятностью 73 %. Первые два разработанных критерия в полной мере решают поставленные задачу. В то же время третий критерий целесообразно исключить из работы системы с целью минимизации числа ложных срабатываний.

На основании данных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемая методика обработки информации может служить основой для разработки системы автоматического контроля состояния, предшествующего моменту истечения шлака из сталеразливочного ковша.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2179191 РФ. Устройство для отсечки шлака в конвертере / Д.В. Захаров, В.И. Савченко, С.Ю. Бубнов и др.; заявл. 22.02.2000; опубл. 10.02.2002.
2. Еронько С.П., Бедарев С.А., Мечик С.В., Пожидаев С.С. Исследование и разработка эффективной системы отсечки конвертерного шлака // Донецкий национальный технический университет. Научные работы. Металлургия. 2007. Вып. 9 (122). С. 121 – 129.
3. Пат. 71681 UA, C21 C/46. Устройство для отсечки шлака при выпуске стали из конвертера / С.П. Еронько, О.М. Смирнов, О.Ю. Цупрун; заявл. 20.04.2004; Опубл. 15.12.2004.
4. Pat. 4222506 A US, US 05/851,773. Tsutomu Sakashita, Isao Yamazaki Molten steel outflow automatically controlling device; publ. 16.09.1980.
5. Pat. 6929773 USA. Kemeny F. L., Walker D I. System and method for minimizing slag carryover during the production of steel. 2005.
6. Pat. 20060219052 A1 US, US 10/560,089. Mats Jalk, Willy Ohlsson, Håkan Kelvesjö. Method and a device for detecting slag US 10/560,089; publ. 5.10.2006.
7. Pat. 2006/0219052 A1 US . Mats Jalk, Willy Ohlsson, Hakan Kelvesjo. Device for cutting off the slag; publ. 5.10.2006.
8. Pat. 6737014 B2 US, US 09/803,607. Slag detector for molten steel transfer operations / Alex Davidkhanian, Frank L. Kemeny, Ali Langari, David I. Walker; publ. 18.05.2004.
9. Uhlenbusch J., Stajduhar M.C., Krajcik W.J. etc. Trial of the R.A.D.A.R. [trademark] vibra-acoustic ladle slag detection system at a European steel plant // Iron Steelmak. 2003. Vol. 30 (7). P. 19 – 21.
10. Da-peng Tan, Pei-yu Li, Xiao-hong Pan. Application of Improved HMM algorithm in slag detection system // Journal of Iron and Steel Research International. 2009. No. 1. P. 1 – 6.
11. Da-peng Tan, Zhe Jiang Univ, Hang Zhou etc. Steel water continuous casting slag detection system based on VQ // Systems, Man and Cybernetics. 2006. No. 10. P. 1315 – 1319.
12. ZhiJian-jun, Qiu Si-ming, Hou An-gui. Application of the ladle slag-carry-over detection technology in Baosteel // Bao Steel Technology. 2004. No. 5. P. 5 – 7.
13. Da-Peng Tan, Pei-Yu Li, Yi-Xuan Ji etc. SA-ANN-Based slag carry-over detection method and the embedded WME platform // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60. No. 10. P. 4702 – 4713.
14. Tan DaPeng, Ji ShiMing, Li PeiYu, Pan XiaoHong. Development of vibration style ladle slag detection methods and the key technologies // Science China.Technological Sciences. 2010. Vol. 53. No. 9. P. 2378 – 2387.
15. Семенов М.В., Красильников С.С., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С. Вибродетектирование шлака при сливе стали из стальковша в промежуточный ковш // Автоматизированные технологии и производства. 2015. №. 2. С. 40 – 42.
16. Dengfeng Chen, Haiyan Xiao, Qichun Ji. Vibration style ladle slag detection method based on discrete wavelet decomposition

// 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2014. P. 3019 – 3022.
17. Коврижных Ю.А., Полещенко Д.А. Разработка системы контроля шлака при сливе стали из стальковша в промковш // Тезисы докл. Междунар. науч.-технич. конф. «Металл-2017». Беларусь, Жлобин. С.12 – 14.
18. Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I. etc. ART-2 neural network usage to determine moment of slag discharge during steel teeming process // Proceedings of 2017 XX IEEE Int. Conf. On Soft Computing and Measurements (Scm). – St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. P. 547 – 550.
19. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Yu.A., Kovriznich Yu.A. Determination of slag outflow moment during steel teeming using competitive neural network // 2017 Int. Siberian Conf. on Control and Communications, SIBCON 2017 – proceedings. – Astana: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, P. 767 – 771.
20. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А. Разработка алгоритма принятия решения об отсечке шлака при разливке стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2018. № 6. С. 36 – 41.

Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.
После доработки 13 марта 2019 г.
Принята к публикации 3 апреля 2019 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2019. Vol. 62. No. 5, pp. 353–359.

DEVELOPMENT AND INDUSTRIAL TESTING OF THE SYSTEM OF SLAG CUT-OFF AT STEEL CASTING PROCESS

Yu.I. Eremenko, D.A. Poleshchenko

Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology "MISiS", Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

Abstract. The authors have analyzed the existing approaches to solve a problem of determining the moment of slag outcome beginning during steel casting from a ladle to a tundish. The solution of this problem is considered in two aspects: the first is the choice of best way to generate a diagnostic signal from the position of the price/quality ratio of its handling, and the second is the development of a method to process this signal in order to obtain useful information. A scheme is proposed to receive a signal of vibration acceleration from a sensor installed on a manipulator of the ladle protective tube. A product sample is developed to arrange that. It provides protection from the influence of industrial disturbances on the sensor. In order to analyze the vibration acceleration signal, the criteria to determine the moment of the slag outcome beginning were determined based on entropy energy calculation. This method and a system developed on its basis are tested under industrial conditions for a real object. The only condition for effective operation of the developed criteria is selection of the subsystem of steel level maintenance at final casting step to the manual mode to eliminate the disturbances from the movement of the slide shutter used to control the flow of liquid steel. According to the results of experiments under real conditions, it was found that the slide shutter control shutdown is to be performed if weight of the ladle content is from 18 to 19 tons approximately. In this mode of operation, the operator has always been able to found such a rate of steel discharge that the level of steel in the tundish is within the technological requirements. As a result, it is possible to ensure the proposed algorithm triggering for each casting earlier than the operator stops the process manually. At the same time, the amount of steel with slag left in ladle does not exceed 3.8 tons comparing to the moment of the slag cut-off made by the operator.

Keywords: metallurgical industry, steel ladle, slag cut-off, energy entropy, vibration acceleration.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-5-353-359

REFERENCES

1. Zakharov D.V., Savchenko V.I., Bubnov S.Yu., Alferov O.N., Yaroshenko A.V., Evsyukov V.N., Bokov S.L., Smol'yaninov V.I. *Ustroistvo dlya otsechki shlaka v konvertere* [Slag cut-off device in converter]. Patent RF no. 2179191. Publ. 10.02.2002. (In Russ.).
2. Eron'ko S.P., Bedarev S.A., Mechik S.V., Pozhidaev S.S. Investigation and development of an effective converter slag cut-off system. *Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet. Nauchnye raboty. Metallurgiya*. 2007, no. 9 (122). pp. 121–129. (In Russ.).
3. Eron'ko S.P., Smirnov O.M., Tsuprun O.Yu. *Ustroistvo dlya otsechki shlaka pri vypuske stali iz konvertera* [Slag cut-off device for steel output from converter]. Patent 71681 UA, C21 C/46. Publ. 15.12.2004. (In Russ.).
4. Tsutomu Sakashita, Isao Yamazaki. *Molten steel outflow automatically controlling device*. Patent US 4222506 A, US 05/851,773. Publ. 16.09.1980.
5. Kemeny F.L., Walker D.I. *System and method for minimizing slag carryover during the production of steel*. Patent USA no. 6929773. 2005.
6. Mats Jalk, Willy Ohlsson, Håkan Kelvesjö. *Method and a device for detecting slag*. Patent US 20060219052 A1, US 10/560,089. Publ. 5.10.2006.
7. Mats Jalk, Willy Ohlsson, Hakan Kelvesjo (SShA) *Device for cutting off the slag*. Patent US 2006/0219052 A1. Publ. 5.10.2006.
8. Alex Davidkhanian, Frank L. Kemeny, Ali Langari, David I. Walker. *Slag detector for molten steel transfer operations*. Patent US 6737014 B2, US 09/803,607. Publ. 18.05.2004.
9. Uhlenbusch J., Stajduhar M.C., Krajcik W.J. etc. Trial of the R.A.D.A.R. [trademark] vibra-acoustic ladle slag detection system at a European steel plant. *Iron Steelmak*. 2003, vol. 30(7), pp. 19–21
10. Da-peng Tan, Pei-yu Li, Xiao-hong Pan. Application of improved HMM algorithm in slag detection system. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009, no. 1, pp. 1–6.
11. Da-peng Tan, Zhe Jiang Univ, Hang Zhou, Pei-yu Li, Li Xu, Guochun Yao. Steel water continuous casting slag detection system based on VQ. *Systems, Man and Cybernetics*. 2006, no. 10, pp. 1315–1319.
12. Zhi Jian-jun, Qiu Si-ming, Hou An-gui. Application of the ladle slag-carry-over detection technology in Baosteel. *Bao Steel Technology*. 2004, no. 5, pp. 5–7.
13. Da-Peng Tan, Pei-Yu Li, Yi-Xuan Ji, Dong-Hui Wen, Chen Li. SA-ANN-Based slag carry-over detection method and the embedded WME platform. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2013, vol. 60, no. 10, pp. 4702–4713.
14. Tan DaPeng, Ji ShiMing, PeiYu L.I., Pan XiaoHong. Development of vibration style ladle slag detection methods and the key technologies. *Science China. Technological Sciences*. 2010, vol. 53, no. 9, pp. 2378–2387.
15. Semenov M.V., Krasil'nikov S.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S. Vibration slag detection during steel outflow from a ladle to a tundish. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva*. 2015, no. 2, pp. 40–42. (In Russ.).
16. Dengfeng Chen, Haiyan Xiao, Qichun Ji. Vibration style ladle slag detection method based on discrete wavelet decomposition.

In: *26th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC)*. 2014, pp. 3019–3022.

17. Kovrizhnykh Yu.A., Poleshchenko D.A. Development of the control system of slag in steel outflow from a ladle to a tundish. In: *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Metall-2017", Belarus', Zhlobin* [References of Int. Sci.-Tech. Conf. "Metal - 2017", Zhlobin, Belarus]. pp. 12–14. (In Russ.).

18. Eremenko Y.I., Poleshchenko D.A., Glushchenko A.I., Tsygankov Y.A., Kovriznich Y.A. ART-2 neural network usage to determine moment of slag discharge during steel teeming process. In: *Proceedings of 2017 XX IEEE Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (Scm). St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2017, pp. 547–550.

19. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A., Tsygankov Yu.A., Kovriznich Yu.A. Determination of slag outflow moment during steel teeming using competitive neural network. In: *2017 Int. Siberian Conf. on Control and Communications, SIBCON 2017 – proceedings*. Astana: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 767–771.

20. Eremenko Yu.I., Poleshchenko D.A. Development of decision-making algorithm for slag cut-off at steel casting. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 6. pp. 36–41. (In Russ.).

Information about the authors:

Yu.I. Eremenko, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Automation and Information Systems"*

D.A. Poleshchenko, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Automation and Information Systems"* (po-dima@yandex.ru)

Received February 7, 2019
Revised March 13, 2019
Accepted April 3, 2019