

торможений со скоростями до 90 км/ч при усилии нажатия на каждую колодку не более 0,6 МПа.

После приработки тормозных колодок цикл испытаний содержал семь остановочных полных служебных торможений “всухую” с начальных скоростей 20, 20, 20, 50, 50, 50, 90 км/ч при на-

жатии на каждую колодку 0,6 МПа. Каждое последующее торможение проводилось при температуре поверхности трения колеса не выше 80 °С. При каждом цикле испытаний измеряли тормозной путь, время торможения, тормозной момент, температуру колодки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асташкевич Б. М. Основные направления по разработке новых марок чугуна и технологий производства тормозных колодок // Вестник машиностроения. 1996. № 3. С. 29–33.
2. Голуб М. В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля: В кн.: Долговечность трущихся деталей машин: Сб. статей. Вып. 1 / Под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. — М.: Машиностроение. 1986. С. 217–234.
3. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение. 1990. — 510 с.
4. Исследование износостойкости модифицированных поверхностей пары трения колесо–рельс / Э. Х. Исакаев, В. Б. Мордынский, А. С. Тюфтяев, Г. И. Пенькова // Технология машиностроения. 2013. № 12. С. 36–39.
5. Тюфтяев А. С., Мордынский В. Б., Желобцов Е. А. Оценка износостойкости высокоуглеродистых сталей в условиях сухого трения и абразивного изнашивания // Сталь. 2015. № 10. С. 55–60.

## Металлургическое оборудование и литейное производство

УДК 621.747

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА СИСТЕМЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

*С. П. ЕРОНЬКО, д-р техн. наук, ersp@meta.ua; Е. В. ОШОВСКАЯ, канд. техн. наук;  
М. В. ЮЩЕНКО, Б. И. СТАРОДУБЦЕВ  
(ГВУЗ “Донецкий национальный технический университет”)*

Одним из способов повышения качества поверхности и структуры непрерывнолитой заготовки за счет улучшения условий ее формирования в кристаллизаторе и силового взаимодействия с его рабочими стенками является дозированная подача в порошкообразном или гранулированном виде шлакообразующих смесей (ШОС) на зеркало кристаллизующегося металла. Эффективность использования таких смесей зависит как от правильно подобранного состава, так и от равномерности их введения в кристаллизатор с постоянным заданным расходом и в строгом соответствии со скоростью вытягивания заготовки, что может быть обеспечено только при наличии систем механизированной подачи мелкодисперсных ШОС. Данные системы должны иметь в своем составе специальные механизмы, обеспечивающие дозированную выдачу из бункера-питателя ШОС, их устойчивую транспортировку к кристаллизатору и равномерное распре-

деление по поверхности находящегося в нем жидкого металла [1].

На кафедре механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета за последние годы выполнено несколько научно-исследовательских работ, связанных с созданием перспективных образцов оборудования данного класса [2]. С учетом результатов, полученных при их использовании на трех слябовых МНЛЗ двух крупнейших металлургических комбинатов Донбасса, была разработана и запатентована дозирующая система, в которую заложены рациональные технические решения, выгодно отличающие ее от известных аналогов [3].

При выборе кинематической схемы привода новой дозирующей системы ставилась задача совокупного использования достоинств вертикального жесткого и гибкого спирального шнеков, а именно — близкий к единице коэффициент

производительности у первого и возможность второго транспортировать сыпучий материал по гибкому рукаву, совершающему движение в пространстве по сложной траектории, т. е. имеющему изгибы. Указанная комбинация двух шнеков позволяет осуществлять регулируемую непрерывную подачу ШОС из бункера, стационарно размещенного на рабочей площадке возле промежуточного ковша, в кристаллизатор МНЛЗ без применения подвижных громоздких дозаторов с длинными, горизонтально расположенными жесткими шнеками. В новой дозирующей системе равномерное распределение ШОС по всей свободной поверхности жидкого металла в кристаллизаторе обеспечивается подающим носком, связанным посредством гибкого металлорукава с бункером-питателем и закрепленным на малогабаритной каретке, передвигающейся с помощью индивидуального привода вдоль длинной стенки кристаллизатора по несущей балке, имеющей возможность плоскопараллельного перемещения для отвода в положение парковки после завершения разливки стали.

Получение ожидаемого эффекта равномерной и регулируемой подачи ШОС с помощью последовательно размещенных жесткого и гибкого шнеков достижимо только в случае обеспечения строгой согласованности их расходных характеристик, зависящих от геометрических параметров и частот вращения самих шнеков. Из теории шнековых дозаторов известно, что частоты вращения жестких и гибких спиральных шнеков, при которых поддерживается устойчивый режим их функционирования, находятся в пределах 100–200 и 300–500 об/мин соответственно [4, 5]. Поэтому комбинированный привод системы дозированной подачи смеси при однодвигательной схеме должен одновременно вращать два шнека с частотами в указанных пределах. На рис. 1 схематично приведен вариант предложенной дозирующей системы с таким приводом. Она включает бункер 11 с расходуемой смесью 9, жестко закрепленный на металлической конструкции 2 и снабженный в нижней части камерой 5, связанной гибким металлорукавом 3 с наклонным подающим носком 1. Внутри бункера 11 в подшипниковых опорах 7 и 18 установлен вертикальный полый трансмиссионный вал 8 со шнеком 6, нижняя цилиндрическая часть которого соосно размещена в камере 5, а верхняя коническая часть расположена в полости бункера. Сверху на бункере установлен электродвигатель 16, который с помощью муфты 15 соединен с быстроходным валом редуктора 14, тихоходный вал которого

посредством муфты 13 и зубчатой пары 12 связан с вертикальным трансмиссионным валом 8. В продольном канале этого вала коаксиально размещен второй вал 10, верхним своим хвостовиком соединенный с помощью муфты 17 с промежуточным валом редуктора 14. К нижнему хвостовику вала 10 жестко прикреплен гибкий спиральный шнек 4, размещенный с возможностью относительного вращения внутри гибкого металлорукава 3 по всей его длине [6].

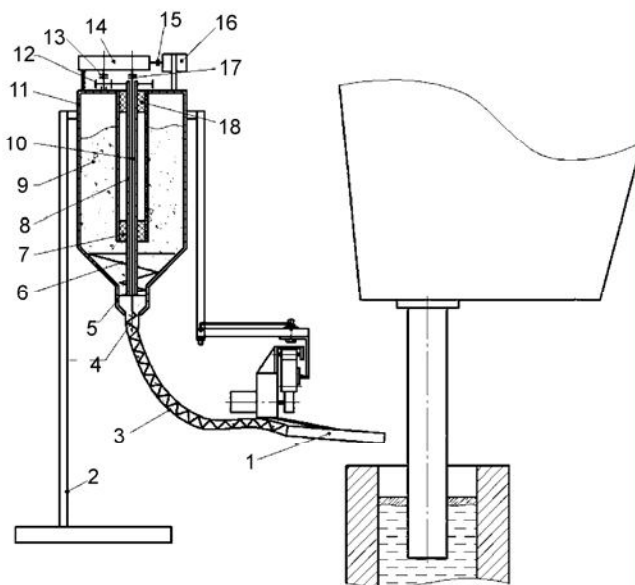


Рис. 1. Конструктивная схема комбинированного привода шнеков системы дозированной подачи ШОС в кристаллизатор МНЛЗ

Оценку энергосиловых параметров работы предложенного комбинированного привода системы дозированной подачи ШОС выполнили экспериментальным путем. Для этого изготовили ее опытный образец, общий вид которого приведен на рис. 2, а также собрали контрольно-измерительный комплекс, включавший тензорезисторный преобразователь, усилитель переменного тока, АЦП и ЭВМ. Указанные аппаратные средства позволяли в режиме реального времени определять значение вращающего момента, развиваемого приводом при одновременном или раздельном вращении жесткого и гибкого спирального шнеков. Это достигалось тем, что тензорезисторный преобразователь, выполнявший роль муфты, соединяющей быстроходный вал редуктора с валом электродвигателя, конструктивно представлял собой гильзу с наклеенными на ее наружную поверхность под углом 45 град. к продольной оси четырьмя фольговыми тензодатчиками, включенными по мосто-

вой схеме. Гильза размещалась в защитном корпусе и была снабжена изолированными от нее кольцами с подпружиненными щетками для съема электрического сигнала во время передачи вращающего момента. Усиленный аналоговый сигнал после преобразования в цифровой код подавался в системный блок ЭВМ для обработки и распечатки. Раздельную работу жесткого и гибкого шнеков обеспечивали путем разъединения муфт, передающих им вращающие моменты от соответствующих валов редуктора.



Рис. 2. Опытный образец разработанной системы подачи ШОС

Контрольные измерения выполнили по заранее подготовленному плану, который предусматривал получение информации как о значениях вращающих моментов, действующих на комбинированный привод системы дозированной подачи ШОС в холостом и нагруженных режимах, так и о доле составляющих суммарного момента  $M_0$ , связанных с раздельной работой жесткого вертикального шнека  $M_{жш}$ , выполнявшего дозирующую функцию, и гибкого спирального шнека  $M_{сш}$ , осуществляющего перемещение сыпучего материала по рукаву от бункера к кристаллизатору МНЛЗ.

Опыты провели для трех фиксированных значений частоты вращения приводного электродвигателя, обеспечивающих устойчивые режимы функционирования обоих шнеков. При этом последовательно комбинировали совместную ра-

боту вертикальных жестких шнеков, имевших диаметр витков  $D_{вш} = 30$  мм, диаметр вала  $d_v = 20$  мм и шаг витков  $S_{вш} = 10-25$  мм, и гибких шнеков с соотношениями диаметра рукава  $D_p$ , диаметра  $d_{вс}$  и шага  $S_{вс}$  витков спирали, составлявшими, мм:  $D_p/d_{вс} = 25/18; 20/16; 15/11$  и  $S_{вс}/d_{вс} = 0,4-0,9$ . В качестве примера на рис. 3 и 4 приведен характерный вид сигналов, зарегистрированных для жесткого шнека с шагом витков 15 мм и спирального шнека диам. 18 мм с шагом витков 12 мм.

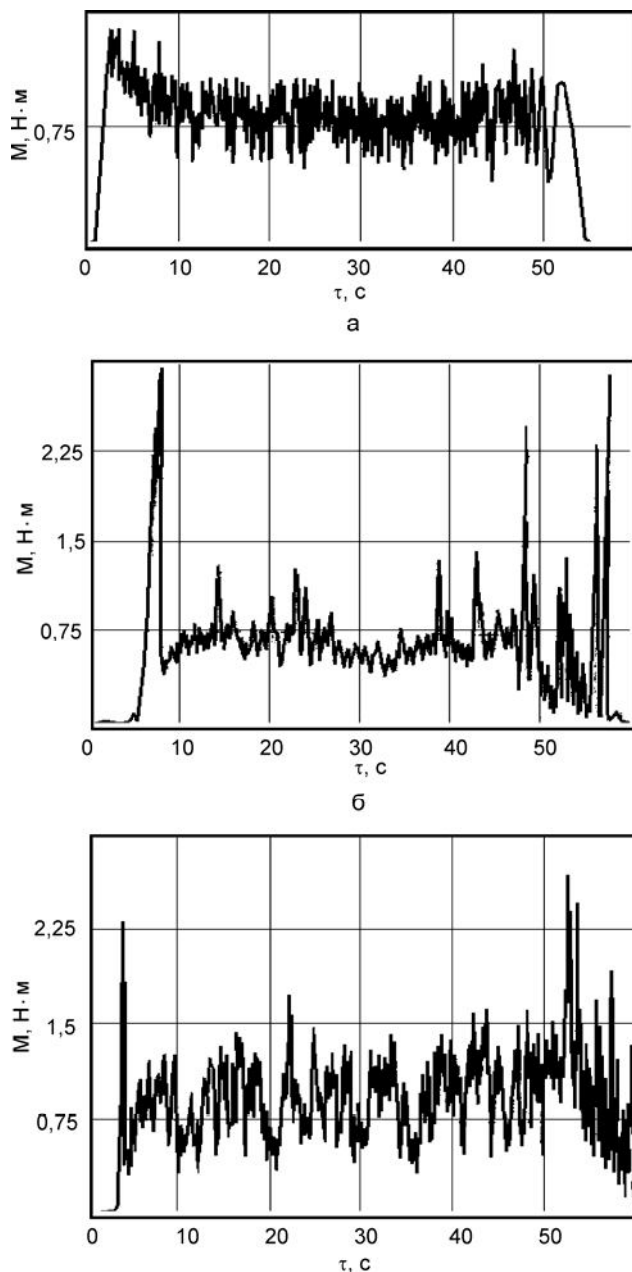
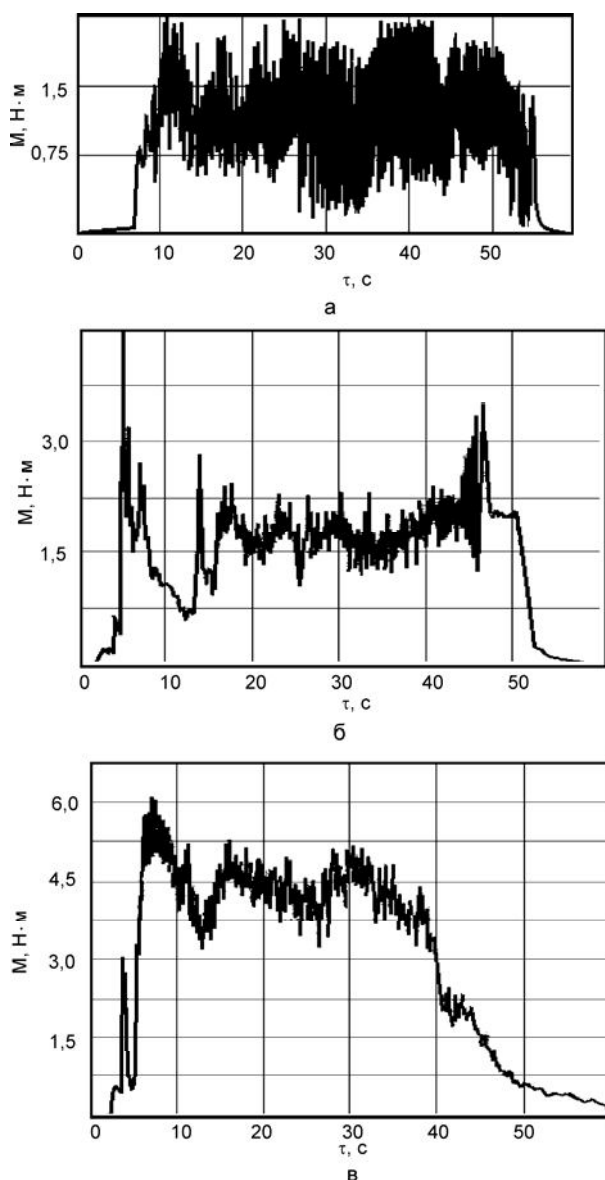


Рис. 3. Момент сопротивления, действующий на вал двигателя при холостом ходе: а — вращается только гибкий шнек; б — вращается только жесткий шнек; в — вращаются оба шнека



**Рис. 4.** Момент сопротивления, действующий на вал двигателя при подаче ШОС:  
*а* — при перемещении материала по рукаву; *б* — при дозированной выдаче материала из бункера жестким шнеком;  
*в* — при работе системы в штатном режиме

В ходе эксперимента одновременно с контролем параметров работы комбинированного привода дозирующей системы фиксировали обеспечиваемую ею производительность в задаваемых режимах функционирования для каждого из девяти вариантов соотношения размеров гибкого спирального шнека. Установлено, что доли моментов сопротивления вращению гибкого и жесткого шнеков составляют соответственно 35–40 и 60–65 % от общего значения момента, преодолеваемого приводом дозирующей системы. Кроме того, моменты сопротивления вращению жесткого вертикального шнека при холостом ходе и дозированной выдаче материала из расходного бункера находятся в соотношении 1:3. При этом для спирального шнека отношение момента холостого хода к моменту сопротивления, возникающему во время транспортирования смеси по гибкому металлорукаву, соотносится как 1:2. Увеличение потерь у гибкого спирального шнека обусловлено трением его витков о стенки металлорукава в местах изгиба.

На основании анализа результатов контроля энергосиловых и расходных характеристик предложенной системы дозированной подачи ШОС (табл. 1) получили информацию, позволившую выбрать рациональное конструктивное исполнение гибкого шнека, при котором одновременно обеспечиваются заданный расход смеси и минимизация энергетических затрат, оцениваемых отношением мощности  $N$  привода системы к ее производительности  $Q$ . В табл. 2 приведены рекомендованные конструктивные параметры, использовавшиеся при разработке линейного ряда систем нового поколения дозированной подачи ШОС в кристаллизаторы сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ [7].

**ТАБЛИЦА 1. ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИВОДА СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШОС**

Размеры и частоты вращения жесткого шнека				Размеры и частоты вращения спирального шнека			Зафиксированные параметры работы системы подачи смеси						
$D_{в1}$ , мм	$d_1$ , мм	$S_{вн1}$ , мм	$n_{ш1}$ , об/мин	$\frac{D_p}{d_v}$	$\frac{S_{вс}}{d_{вс}}$	$n_{с1}$ , об/мин	$M_{см1}$ , Н·м	$M_{жш}$ , Н·м	$M_{о1}$ , Н·м	$n_{о1}$ , об/мин	$N_1$ , кВт	$Q$ , т/ч	$\frac{N/Q}{\frac{кВт/ч}{т}}$
30	20	10	120	$\frac{15}{11}$	0,43	300	0,39	0,60	1,0	900	0,132	0,021	6,3
			400			0,38	0,61	1,2	1200	0,148	0,027	5,5	
			500			0,41	0,75	1,4	1500	0,155	0,029	5,3	
			300			0,63	1,05	1,8	900	0,170	0,033	5,2	
			400			0,60	0,80	1,9	1200	0,188	0,037	5,1	
			500			0,70	1,15	2,0	1500	0,195	0,038	5,2	
			120		0,52	300	0,70	1,25	2,1	900	0,220	0,035	6,3
			160			0,71	1,30	2,2	1200	0,240	0,036	6,3	
			200			0,73	1,35	2,2	1500	0,251	0,038	6,6	

Размеры и частоты вращения жесткого шнека				Размеры и частоты вращения спирального шнека		Зафиксированные параметры работы системы подачи смеси								
30	20	15	120	20	16	0,43	300	0,87	1,30	2,4	500	0,226	0,037	6,1
			160				400	0,89	1,35	2,4	1200	0,301	0,055	5,4
			200				500	0,91	1,50	2,5	1500	0,392	0,072	5,4
			120			0,54	300	0,90	2,60	2,9	900	0,273	0,053	5,1
			160				400	0,90	1,75	2,9	1200	0,364	0,088	4,1
			200				500	0,95	1,95	3,0	1500	0,471	0,094	5,0
			120			0,76	300	0,90	2,05	3,0	900	0,282	0,055	5,1
			160				400	0,91	2,10	3,1	1200	0,389	0,073	5,3
			200				500	0,92	2,15	3,2	1500	0,502	0,093	5,4
30	20	25	25	18	0,45	300	1,30	2,00	3,3	900	0,310	0,068	4,5	
						400	1,30	2,10	3,4	1200	0,427	0,094	4,5	
						500	1,35	2,15	3,6	1500	0,565	0,128	4,4	
					120	0,64	300	1,40	2,25	3,8	900	0,357	0,081	4,4
					160		400	1,50	2,45	4,2	1200	0,527	0,138	3,8
					200		500	1,60	2,50	4,5	1500	0,706	0,144	4,9
					120	0,85	300	1,50	2,65	4,3	900	0,405	0,076	5,3
					160		400	1,55	2,80	4,8	1200	0,602	0,109	5,5
					200		500	1,60	3,50	5,4	1500	0,847	0,136	6,7

ТАБЛИЦА 2. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ ШОС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МНЛЗ

Тип МНЛЗ	Требуемый расход смеси, кг/мин	Параметры жесткого шнека				Параметры спирального шнека			Параметры привода		Обеспечиваемый расход смеси, кг/мин
		$D_{в1}$ , мм	$d_1$ , мм	$S_{шп1}$ , мм	$n_{ш1}$ , об/мин	$\frac{D_p}{d_b}$	$\frac{S_{вс}}{d_{вс}}$	$n_{с1}$ , об/мин	$N_1$ , кВт	$n_d$ , об/мин	
Сортовые	0,2–0,6	30	20	10	160	$\frac{15}{11}$	0,5	400	0,2	1200	0,4–0,6
Блюмовые	0,5–1			15		$\frac{20}{16}$	0,55		0,36		0,7–1
Слябовые	0,8–2			25		$\frac{25}{18}$	0,65		0,52		1,2–2

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований комбинированного привода, обеспечивающего совместное функционирование от одного двигателя последовательно установленных жесткого дозирующего и гибкого транспортирующего шнеков, по-

зволили обосновать рациональные соотношения конструктивных и энергосиловых параметров систем дозированной подачи ШОС в кристаллизаторы МНЛЗ и за счет этого снизить затраты на их эксплуатацию.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куклев А. В., Лейтес А. В. Практика непрерывной разливки. — М.: Metallurgizdat. 2011. — 432 с.
2. Еронько С. П. Опыт конструирования систем дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". 2011. № 11. С. 35–40.
3. Пат. UA 107731 Украины, МПК В 22 D 11/10. Устройство для непрерывной дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок / С. П. Еронько, М. В. Ющенко, С. В. Мечик и др. № 201305843. Заявл. 07.05.2013. Оpubл. 10.11.2014. Бюл. № 21.
4. Григорьев А. М. Винтовые конвейеры. — М.: Машиностроение. 1972. — 184 с.
5. Геррман Х. Шнековые машины и технологии. — Л.: Химия. 1975. — 228 с.
6. Еронько С. П., Ющенко М. В. Усовершенствованная система дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. 2013. № 4. С. 74–81.
7. Еронько С. П., Ющенко М. В., Мечик С. В. Системы нового поколения дозированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы МНЛЗ // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". 2014. № 3. С. 87–92.