

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ СТАРТОВОЙ СМЕСИ В КАНАЛ КОВШОВОГО ЗАТВОРА

С. П. ЕРОНЬКО, *д-р техн. наук, ersp@meta.ua*; С. В. МЕЧИК, М. Ю. ТКАЧЕВ, И. С. ПОГОРЕЛОВ, Е. С. САРКИСЯН
(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»)

Одной из обязательных операций при подготовке сталеразливочного ковша к приему металла очередной плавки является заполнение его выпускного канала так называемой стартовой смесью — порошкообразным или мелкозернистым материалом, который не спекается при температурах 1600–1650 °С, не смачивается жидкой сталью и обладает высокой текучестью. Благодаря указанным свойствам данный материал при первом открывании затвора беспрепятственно высыпается из канала ковша, что позволяет начать разливку стали в штатном режиме [1].

Подачу смеси в канал разливочного стакана, размещенного в толще футеровки днища ковша, осуществляют либо из опущенного краном в его полость кессона, установленного над гнездовым блоком, либо с использованием наклонной трубы, нижний конец которой удерживают над входным отверстием стакана, и через закрепленную на ее верхнем конце воронку из мерной емкости подают сыпучий материал [2]. Такая практика связана с применением ручного труда, а также с необходимостью соблюдения специальных мер безопасности.

В конвертерном цехе одного из украинских металлургических предприятий была также опробована схема подачи материала с помощью бункера, имеющего в нижней части заслонку и установленного на поворотной консоли на одной вертикальной оси с каналом разливочного ковша. После открытия заслонки порошкообразный материал самотеком ссыпается в зону размещения входного отверстия выпускного канала [3]. При этом из-за воздействия восходящих конвективных потоков нагретого воздуха на вертикальную струю мелкодисперсного материала, истекающего из бункера с высоты нескольких метров, некоторая его часть рассеивается в полости ковша, что приводит к повышенному расходу стартовой смеси.

С учетом отмеченных негативных факторов сотрудниками кафедры механического оборудования заводов черной металлургии Донецкого национального технического университета разработана система механизированной подачи сы-

пучих материалов в выпускной канал разливочного ковша, схематично показанная на рис. 1. Она включает: поворотную колонну 14, установленную на основании 17 и несущую консоль, выполненную из двух балок 13, жестко связанных поперечиной 3. Вдоль балок расположены направляющие для колесных пар подвижной тележки 7, поддерживающей бункер 5 с прикрепленным к его нижней части гибким металлорукавом 2. Привод перемещения тележки, состоящий из реверсивного червячного мотор-редуктора 11 с закрепленной на его выходном валу ведущей звездочкой 12, посредством пластичной цепи 9 передает через ведомую звездочку 6 вращение вала, установленному в подшипниковых опорах на поперечине 3. При этом пластичная цепь, обвивающая звездочки 6 и 12, своими концами связана с рамой тележки с помощью натяжных винтов и сообщает ей поступательное движение по направляющим вдоль консоли. Нижняя ветвь пластинчатой цепи 9 поддерживается несколькими скользящими 10, что уменьшает ее провисание.

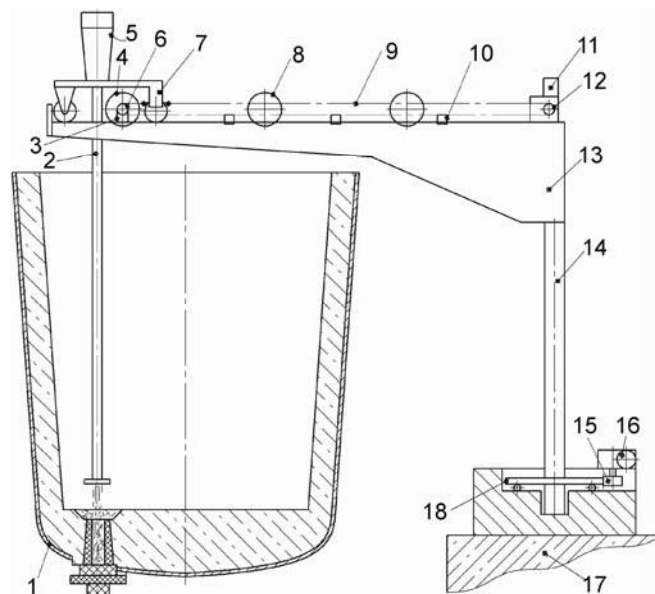


Рис. 1. Конструкция системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшового затвора

Между подшипниковыми опорами на валу ведомой звездочки 6 в средней его части жестко закреплен шкив 4, имеющий кольцевую канавку, форма которой соответствует половинному поперечному сечению металлорукава 2. Причем диаметр шкива по максимальному углублению продольной канавки равен диаметру ходового колеса тележки. Вдоль консольной балки в одной вертикальной плоскости с одинаковым шагом установлены несколько свободно вращающихся на осях направляющих роликов 8, препятствующих провисанию металлорукава при нахождении его в горизонтальном положении. Для поворота всей системы относительно сталеразливочного ковша 1 служит электромеханический привод, состоящий из червячного мотор-редуктора 16 с вертикальным валом, на хвостовике которого закреплена прямозубая шестерня 15, находящаяся в зацеплении с зубчатым венцом опорного диска 18, удерживающего поворотную колонну 14.

Система размещена на участке обслуживания сталеразливочных ковшей и функционирует следующим образом. Сталеразливочный ковш по завершении операций, связанных с осмотром и обслуживанием его разливочного узла (промывка кислородом выпускного канала для удаления застывших остатков шлака и металла, закрытия затвора), устанавливается краном в обозначенном месте возле поворотной колонны при отведенной в сторону консоли и находящейся в исходном положении тележке с заполненным бункером. Затем колонну поворачивают на требуемый угол и останавливают с таким расчетом, чтобы продольная ось симметрии консоли проходила над центром выпускного канала ковша. Далее с помощью цепного привода тележку переводят в рабочую позицию. Во время поступательного движения тележки, благодаря равенству диаметров ее ходового колеса и шкива в месте контакта с огибающим его металлорукавом, последний будет перемещаться синхронно с тележкой. В результате этого свободный конец металлорукава совершает вертикальное движение вниз и в момент перехода тележки в рабочую позицию окажется непосредственно над входным отверстием канала разливочного ковша. При этом металлорукав выпрямится, образуя вертикальный подающий тракт, по которому стартовая смесь, обладающая высокой текучестью, начнет сыпаться из бункера в выпускной канал ковша, не подвергаясь воздействию воздушных конвективных потоков. Как только бункер опорожнится, тележку переводят в положение парковки и металлорукав, связанный верхним концом с бункером, окажется уложенным на направляющие ролики. Перед началом транспортировки ковша краном к сталеплавильному агрегату для приема металла очередной

плавки необходимо отвернуть консоль в исходное положение.

Проектированию промышленного образца предложенной системы предшествовала разработка методики расчета конструктивных и энергосиловых параметров механизмов поворота колонны и перемещения тележки.

В соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 2, на элементы механизма поворота колонны действуют силы тяжести самой колонны G_k , опорного диска $G_{од}$, несущей консоли $G_{нк}$, тележки с бункером G_t и находящейся в нем стартовой смеси $G_{см}$, привода механизма перемещения тележки $G_{пт}$, металлорукава G_p и пластинчатой цепи G_c .

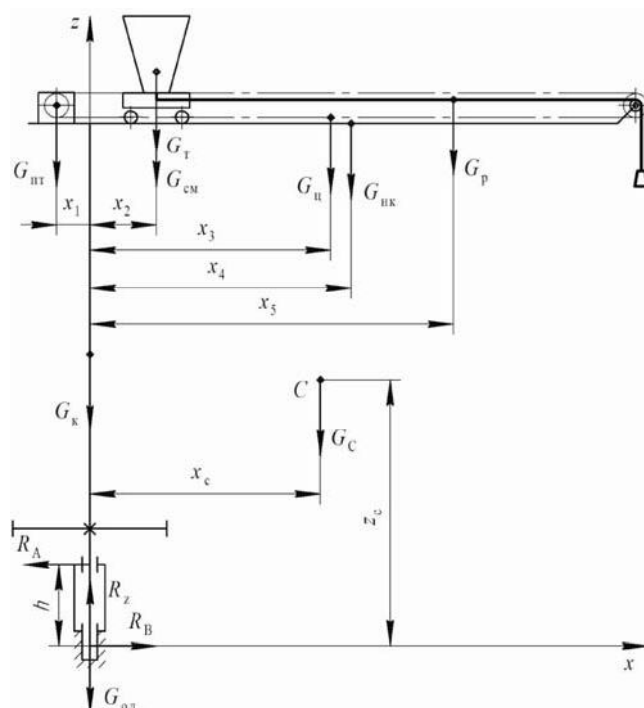


Рис. 2. Расчетная схема привода механизма поворота колонны

Предварительно необходимо определить координаты центров тяжести отдельных узлов, а затем — общие координаты центра масс всего поворотного механизма системы:

$$x_c = \frac{\sum x_i m_i}{M}, \quad y_c = \frac{\sum y_i m_i}{M}, \quad z_c = \frac{\sum z_i m_i}{M},$$

где x_i, y_i, z_i — координаты центров масс составных элементов поворотного механизма, м; m_i — массы отдельных элементов, кг; M — общая масса поворотного механизма системы, кг.

Определение реакций опор:
— вертикальная в подпятнике

$$R_z = G_c = Mg,$$

где G_c — общая сила тяжести поворотной системы манипулятора, Н;

$$R_A = R_B = \frac{G_c x_c}{h},$$

где x_c — расстояние от оси центра тяжести системы до оси вращения колонны, м; h — расстояние между подшипниковыми опорами, м.

Статический момент от сил трения в опорах относительно оси колонны

$$M_c = R_A r_A \mu_1 + R_B r_B \mu_1 + R_z r_n \mu_2,$$

где r_A, r_B, r_n — радиусы цапф опор A, B и упорного подшипника соответственно, м; μ_1 — коэффициент трения в радиальных подшипниках; μ_2 — коэффициент трения в опорном подшипнике.

Динамический момент при пуске привода

$$M_d = J \varepsilon,$$

где J — суммарный момент инерции системы относительно оси Z ; ε — угловое ускорение системы при времени ее разгона t_p .

Суммарный момент инерции системы относительно оси Z

$$J = \sum (J_{ci} + m_i x_i^2),$$

где J_{ci} — момент инерции структурного элемента системы относительно оси, проходящей через его центр массы.

Угловое ускорение системы

$$\varepsilon = \frac{\omega_k}{t_p},$$

где ω_k — заданная угловая скорость поворота колонны, c^{-1} .

Статическая мощность привода

$$N_c = \frac{M_c \omega_k}{\eta_m},$$

где η_m — коэффициент полезного действия механизма.

Общее передаточное число привода механизма поворота колонны

$$i_o = i_1 i_{чр} = \frac{\omega_{дв}}{\omega_k},$$

где i_1 — передаточное число прямозубой зубчатой передачи; $i_{чр}$ — передаточное число червячного редуктора; $\omega_{дв}$ — угловая скорость вала электродвигателя, c^{-1} .

Выбранный по каталогу двигатель следует проверить на пусковую способность:

$$\frac{M_c + M_d}{M_n i_o} \leq \lambda,$$

где M_n и λ — паспортное значение номинального момента и средняя кратность пускового момента выбранного двигателя соответственно.

Для расчета энергосиловых параметров привода передвижения тележки следует рассмотреть два положения механизма:

1) тележка с загруженным стартовой смесью бункером начинает движение из положения парковки в рабочую позицию (рис. 3, а), при этом большая часть металлорукера находится в горизонтальном положении;

2) тележка с порожним бункером начинает движение из рабочей позиции в положение парковки (рис. 3, б), при этом металлорукер находится в вертикальном положении.

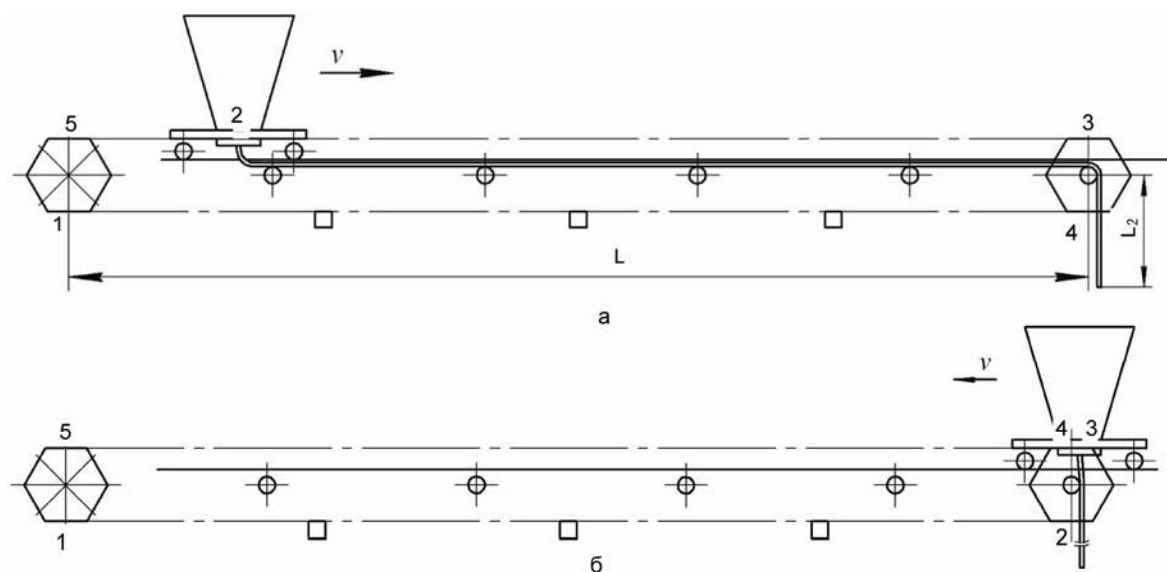


Рис. 3. Расчетные схемы механизма перемещения тележки для первого (а) и второго (б) положений

Принимаем следующие обозначения:

q_u — вес 1 м приводной цепи, Н/м; q_p — вес 1 м металлорукава, Н/м; G_{cm} — сила тяжести стартовой смеси, загруженной в бункер, Н; G_r — сила тяжести тележки, Н; L — расстояние между осями приводной и натяжной звездочек, м; L_p — длина металлорукава, м; L_2 — длина вертикальной части металлорукава в первом положении механизма, м.

При движении тележки из положения парковки в рабочую позицию (см. рис. 3, а) минимальное натяжение цепи будет в точке 1. По рекомендациям работы [4] можно принять $S_1 = S_{min} = 1000-2000$ Н.

Натяжение цепи в точке 2:

$$S_2 = S_1 + \left(\frac{q_u L}{2} + G_r + G_{cm} \right) f_1 + q_p L_p f_2 q_p L_2,$$

где f_1 — коэффициент сопротивления движению тележки; f_2 — коэффициент сопротивления движению металлорукава по направляющим роликам:

$$f_1 = \frac{\mu d + 2k}{D} k_p, \quad f_2 = \frac{\mu d_n + 2k_n}{D_n} k_{np},$$

где μ — коэффициент трения скольжения в подшипниках колес и направляющих роликов; d, d_n — диаметр цапф колес тележки и направляющих роликов соответственно, мм; k, k_n — коэффициенты трения качения колес тележки по рельсам и направляющих роликов по металлорукаву, мм; k_p, k_{np} — коэффициенты увеличения сопротивления от трения реборд колес тележки о рельсы и металлорукава о профилированные канавки направляющих роликов, $k_p = k_{np} = 1,2-1,5$ [4]; D, D_n — диаметры колес тележки и направляющих роликов, мм.

Натяжение цепи в точке 3:

$$S_3 = S_2.$$

Натяжение цепи в точке 4:

$$S_4 = kS_3,$$

где k — коэффициент увеличения натяжения цепи при огибании звездочки, $k = 1,08-1,12$ [4].

Натяжение цепи в точке 5:

$$S_5 = S_4 + q_u L \omega,$$

где ω — коэффициент сопротивления движению цепи по опорным скользянам.

Тяговое усилие

$$W = S_5 - S_1 + (k - 1)(S_5 + S_1).$$

Мощность привода

$$N = \frac{(W + F_{ин})v}{\eta},$$

где v — скорость движения тележки, м/с; η — коэффициент полезного действия механизма передвижения тележки; $F_{ин}$ — сила инерции, действующая на систему в период пуска, Н:

$$F_{ин} = \frac{G_r + G_{cm} + G_p}{g} a,$$

где a — ускорение при пуске, которое можно принять равным $0,2$ м/с², как для мостовых кранов и тележек общего назначения при гибкой подвеске груза [4]; $g = 9,8$ м/с² — ускорение силы тяжести.

При движении тележки из рабочей позиции в парковочную (см. рис. 3, б) минимальное натяжение цепи, принимаемое равным $S_1 = S_{min} = 1000-2000$ Н, будет в точке 1.

Натяжение цепи в точке 2:

$$S_2 = S_1 + q_u L \omega,$$

Натяжение цепи в точке 3:

$$S_3 = kS_2.$$

Натяжение цепи в точке 4:

$$S_4 = S_3 + \left(\frac{q_u L}{2} + G_r \right) \omega_1 + q_p L_p k_1,$$

где k_1 — коэффициент увеличения сопротивления движению при огибании металлорукавом крайнего направляющего ролика на угол до 90 град., $k_1 = 1,03$ [3].

Натяжение цепи в точке 5:

$$S_5 = S_4.$$

Тяговое усилие

$$W = S_5 - S_1 + (k - 1)(S_5 + S_1).$$

Мощность привода

$$N = \frac{(W + F_{ин})v}{\eta},$$

где $F_{ин}$ — сила инерции, действующая на систему в период пуска, Н:

$$F_{ин} = \frac{G_r + G_p}{g} a.$$

По наибольшему из рассчитанных значений мощности привода для каждого из двух положе-

ний механизма и с учетом повторно-кратковременного режима работы механизма выбирают из каталога электродвигатель ближайшей меньшей мощности. Выбранный электродвигатель необходимо проверить на пусковую способность и нагрев.

Передаточное число редуктора привода

$$i_p = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{зв}},$$

где $\omega_{дв}$ — угловая скорость вала двигателя; $\omega_{зв}$ — угловая скорость приводной звездочки;

$$\omega_{зв} = \frac{2v}{D_3},$$

где v — скорость движения тележки, м/с; D_3 — диаметр делительной окружности приводной звездочки, м.

Для экспериментальной проверки правильности принятых технических решений и корректности методики расчета конструктивных и энергосиловых параметров механизмов системы подачи стартовой смеси спроектировали и изготовили ее лабораторный образец (рис. 4).

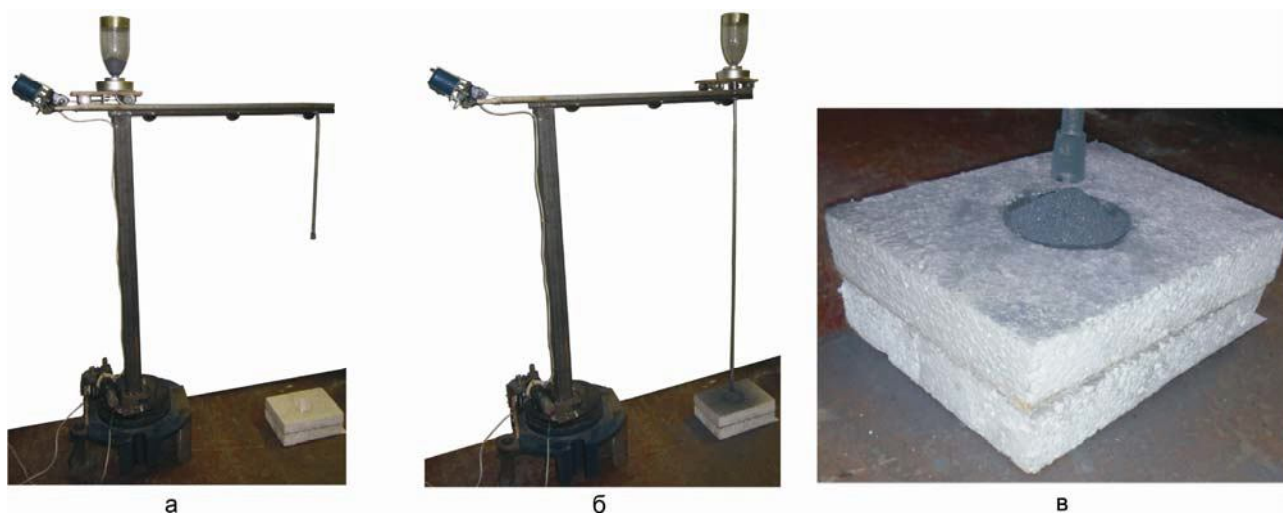


Рис. 4. Лабораторный образец системы механизированной подачи стартовой смеси в канал ковшевого затвора в исходном (а) и конечном (б) положениях и гнездовой блок модели ковша с заполненным смесью выпускным каналом (в)

В ходе проводившихся тестовых испытаний осуществляли контроль точности позиционирования подающего металлорукава относительно центральной продольной оси модели выпускного канала сталеразливочного ковша, а также стабильности процесса его заполнения сыпучим материалом. При этом проверили функционирование механизмов поворота колонны и передвижения тележки и оценили вносимую ими долю погрешности позиционирования металлорукава относительно выпускного канала ковша. С этой целью предварительно выполнили настройку концевых выключателей, обеспечивающих остановку подвижных элементов исследуемой системы в нужных положениях относительно емкости, имитирующей верхнюю часть выпускного канала сталеразливочного ковша. Затем многократно осуществили перевод системы из исходного положения в рабочее и визуально контролировали процесс взаимодействия подвижно сопряженных деталей и точность подачи сыпучего материала в полость модели выпускного канала ковша. За абсолютную погрешность позиционирования принимали измеренное смещение оси

металлорукава относительно оси выпускного канала. Относительную погрешность позиционирования рассчитывали как отношение абсолютной погрешности к максимальному расстоянию L_{max} от оси ближайшей к основанию системы кинематической пары (т. е. поворотной колонны) до границы рабочей зоны:

$$\Delta_{отн} = \frac{\Delta_{абс}}{L_{max}} 100 \%,$$

Усредненное значение относительной погрешности позиционирования при моделировании определяли как среднеквадратическое по результатам 10 измерений. По полученным данным путем пересчета с использованием линейного масштаба лабораторного образца системы определили значения обеспечиваемых абсолютной и относительной погрешностей позиционирования промышленных систем, предназначенных для обслуживания сталеразливочных ковшей вместимостью 50, 100 и 250 т. Экспериментальная проверка функционирования механиз-

мов предложенной системы механизированной подачи стартовой смеси подтвердила их работоспособность и обеспечение ими точности позиционирования металлорукава, требуемой для подачи сыпучего материала в выпускной канал разливочного ковша. Колебание металлорукава во время его опускания практически отсутствовало.

С учетом результатов лабораторных исследований и с использованием описанной выше методики рассчитали основные параметры промышленных систем, предназначенных для обслуживания сталеразливочных ковшей различной вместимости (см. таблицу), и выполнили их рабочие проекты для потенциальных заказчиков.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЗМОВ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ СТАРТОВОЙ СМЕСИ

Вместимость ковша, т	Механизм поворота колонны				
	скорость поворота, рад/с	мощность привода, кВт	абсолютная погрешность позиционирования, град.	относительная погрешность позиционирования, %	масса, кг
50	0,26	0,3	0,3	0,5	600
100	0,26	0,5	0,4	0,7	1200
250	0,26	1,0	0,5	0,9	2200
Вместимость ковша, т	Механизм перемещения тележки				
	скорость движения, м/с	мощность привода, кВт	абсолютная погрешность позиционирования, мм	относительная погрешность позиционирования, %	масса, кг
50	0,3	0,12	10	0,3	120
100	0,4	0,15	15	0,4	200
250	0,5	0,2	20	0,5	320

Внедрение предложенной разработки позволит не только улучшить условия труда персонала сталеплавильных цехов, занятого подготовкой разливочных ковшей к приему жидкой

стали, но и повысить качество выполнения необходимых операций, а также обеспечить рациональное использование дорогостоящих стартовых смесей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еронько, С. П. Разливка стали. Оборудование. Технология [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — Киев: Техніка, 2003. — 216 с.
2. Куклев, А. В. Практика непрерывной разливки стали [Текст] / А. В. Куклев, А. В. Лейтес. — М.: Metallurgizdat, 2011. — 432 с.
3. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк: ДонНТУ, 2011. — 482 с.
4. Иванченко, Ф. К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин [Текст] / Ф. К. Иванченко, В. С. Бондарев, Н. П. Колесник [и др.]. — Киев: Вища школа, 1978. — 576 с.