

С.И. Лукьянов, А.Е. Васильев, Д.В. Швидченко, Е.С. Суспицын,  
И.Л. Погорелов, В.П. Лукьянов, В.Н. Данилов

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТЯНУЩЕ-ПРАВИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Технология непрерывной разливки стали и конструкция машин постоянно совершенствуются в направлении повышения качества отливаемой заготовки и производительности каждой машины. Увеличение производительности машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) прямо связано с увеличением линейной скорости разливки.

По данным Международного института чугуна и стали основными причинами ограничения линейной скорости разливки являются: качество внутренней структуры заготовки и частота прорыва металла. Обусловлено это тем, что с увеличением скорости разливки возрастает интенсивность охлаждения заготовки и скорость её деформации, что неминуемо приводит к снижению качества внутренней структуры заготовки и увеличению вероятности прорыва корочки слитка. Поэтому в реальных промышленных условиях показатели средней скорости разливки стали значительно ниже проектных. Так, на МНЛЗ № 1–4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при номинальной проектной скорости разливки 1,5 м/мин среднегодовые показатели скорости за 10 лет эксплуатации МНЛЗ составили около 0,7 м/мин. О масштабах экономических потерь свидетельствует тот факт, что снижение скорости разливки на одном ручье только на 1% относительно проектного значения наносит ущерб около 1 млн руб. в год.

За последние десятилетия выполнен большой объем технологических и конструкторских работ по совершенствованию установок МНЛЗ, однако из всего многообразия факторов, определяющих качество литой заготовки, весьма недостаточно рассмотрены вопросы влияния электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ), формирующего один из основных технологических факторов – схему приложения тянущего усилия, на процесс кристаллизации слитка и образование дефектов макроструктуры литой заготовки. В литературных источниках указано, что тянущие ролики в процессе вытягивания заготовки формируют в последней дополнительные продольные усилия, которые являются одной из причин образования дефектов. Однако конкретная оценка значений этих продольных усилий, изменения их вдоль ЗВО

и влияния на качество непрерывнолитой заготовки отсутствует. Отсутствует и четкое обоснование одного из базовых требований к электроприводу ТПУ – равномерного деления нагрузки вытягивания заготовки между электродвигателями тянущих роликов для ограничения растягивающих усилий в оболочке кристаллизующегося слитка. Слабо отражено влияние электропривода на качество макроструктуры слитка. Нет ясности и в целесообразном распределении управляемых и неуправляемых электроприводов тянущих роликов вдоль технологического канала ЗВО с позиций снижения дефектов в литой заготовке и увеличения скорости разливки. Проблема обеспечения качественной работы электропривода тянущих роликов ЗВО с позиций роста производительности МНЛЗ при сохранении качества слитка потребовала и более глубокого исследования электропривода на действующих объектах.

В большинстве отечественных и зарубежных МНЛЗ применяется электропривод постоянного тока с силовым питанием всех электродвигателей от одного или двух тиристорных преобразователей. Системы управления строятся по принципу подчиненного регулирования с внутренним астатическим контуром регулирования тока и внешним статическим контуром регулирования скорости вращения одного или нескольких электродвигателей тянущих роликов или напряжения с выхода ТП. В существующих системах управления электроприводом ТПУ отсутствует возможность плавного регулирования распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов. Выравнивание нагрузок между электродвигателями осуществляется смягчением их механических характеристик за счет включения в цепь якоря каждого электродвигателя добавочных сопротивлений [1].

Задача разработки автоматизированного электропривода тянуще-правильного устройства МНЛЗ, обеспечивающего увеличение производительности машины посредством увеличения скорости литья заготовки за счет улучшения качества внутренней структуры и уменьшения вероятности прорыва корочки непрерывнолитого слитка, потребовала решения следующих вопросов:

- создания методики оценки влияния электропривода ТПУ на качество макроструктуры непрерывнолитого слитка;
- создания методики определения требуемого по технологии распределения моментов нагрузки по тянущим роликам ТПУ и методики оценки продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ;
- определения показателей настройки электропривода ТПУ, позволяющих выполнить его оптимизацию по критерию качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок;
- создания динамической модели электропривода ТПУ с учетом реальных параметров упругой связи электродвигатель – тянущий ролик, фрикционной связи тянущий ролик – слиток и условий контакта тянущие ролики – слиток;
- обоснования технологических требований к электроприводу ТПУ с позиций снижения неравномерности распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов, максимальных значений статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке и обеспечения стабильности протекания процесса литья заготовки в условиях автоколебаний скорости разливки;
- создания технических средств и алгоритмов управления автоматизированным электроприводом ТПУ, обеспечивающих ограничение статических и динамических продольных усилий в слитке и уменьшение неравномерности распределения нагрузок по тянущим роликам;
- промышленной апробации и внедрения полученных результатов, оценки их технической и экономической эффективности.

В результате теоретических и экспериментальных исследований электропривода ТПУ на типовых МНЛЗ криволинейного типа ОАО "ММК" установлено [2]:

– при неизменном задании скорости разливки в электропривод ТПУ наблюдаются два режима его работы, отражающие различные физические явления в роликовой проводке ЗВО.

В первом режиме работы электропривода ТПУ при неизменных скорости литья и общем токе электропривода на ряде электродвигателей тянущих роликов происходят устойчивые, неизменные по числовым характеристикам колебания двух форм токов. Одна форма изменения тока обусловлена наличием остаточного прогиба бочки тянущего ролика, а вторая – периодическими буксовками тянущих роликов по слитку.

Во втором режиме работы электропривода вытягивание слитка сопровождается устойчивыми колебаниями токов всех электродвигателей тянущих роликов, общего тока электропривода ТПУ и скорости разливки. Адекватным отображением этого режима работы электропривода ТПУ являются колебания общего тока и скорости разливки. При наличии автоколебаний в электропривод ТПУ изменение скорости разливки достигает 13% от заданного значения, что противоречит одному из основных требований к электроприводу ТПУ – поддержания скорости разливки с точностью  $\pm 2\%$ ;

– существующая схема электропривода ТПУ не обеспечивает равномерного деления общего тока нагрузки между электродвигателями тянущих роликов. На различных ручьях МНЛЗ № 1–4 вид неравномерности распределения рабочих токов и токов холостого хода вдоль ЗВО различный, и установить какие-либо общие аналитические закономерности распределения токов не представлялось возможным. Доля значений токов холостого хода в общем рабочем токе электропривода ТПУ существенна и достигает 60%, поэтому оценку реального усилия, развиваемого конкретным электродвигателем на контакте его тянущего ролика со слитком, необходимо выполнять за вычетом тока холостого хода. При изменении скорости разливки и по истечении времени с момента проведения капитальных работ происходит существенное перераспределение тока электропривода ТПУ между электродвигателями тянущих роликов. В качестве оценки неравномерности распределения токов нагрузки применен коэффициент вариации:

$$v_I = S_I / I, \quad (1)$$

где  $S_I$  – среднее квадратическое отклонение значений токов электродвигателей от математического ожидания  $I$  тока нагрузки группы электродвигателей;

– в реальных условиях литья заготовки тянущие ролики радиального, криволинейного, и первой группы горизонтального участков всегда загружены менее требуемых значений. Напротив, ролики второй группы горизонтального участка существенно (33,3...45,1% вместо требуемых 3,0...6,0%) в реальных условиях загружены более требуемых по технологии значений. Следовательно, тянущие ролики второй группы горизонтального участка создают в слитке статические продольные усилия (натяжение) и посредством этого разгружают тянущие ролики остальных групп ТПУ. На основании несоответствия распределения моментов вытягивания заготовки в существующем

электроприводе ТПУ, требуемому по технологии, разработана математическая модель распределения статических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом ТПУ [3]:

$$\begin{aligned} F_{n-1,n} &= F_{Pn} - F_{Mn}; \\ F_{n-2,n-1} &= F_{n-1,n} + (F_{Pn-1} - F_{Mn-1}); \\ &\dots \\ F_{i-1,i} &= \sum_{j=n,-1}^{i+1} F_{j-1,j} + (F_{Pi} - F_{Mi}); \\ &\dots \\ F_{1,2} &= \sum_{j=n,-1}^3 F_{j-1,j} + (F_{P2} - F_{M2}). \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_{i-1,i}$  – статическое продольное усилие, создаваемое в слитке электроприводом ТПУ, в пространстве между  $i-1$  и  $i$ -м приводными роликами;  $F_{Pi}$  – реальное усилие вытягивания слитка, развиваемое  $i$ -м тянущим роликом;  $F_{Mi}$  – требуемое по технологии усилие вытягивания слитка, рассчитанное на модели распределения моментов по приводным роликам ЗВО, необходимое и достаточное для транспортировки слитка в соответствующем  $((i-1)-i)$ -м межроликовом промежутке.

Усилие  $F_{Mi}$  сопротивления вытягиванию заготовки в одном межроликовом пространстве ЗВО для МНЛЗ криволинейного типа определяется из выражения:

$$\begin{aligned} F_{Mi} &= F_{KP} + f_i (P_{\Phi i} + G_{Qi} + G_{Pi} + \\ &+ P_{Ppi} + P_{Tpi}) + F_{BМi} - G_{Ti}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F_{KP}$  – усилие вытягивания слитка из кристаллизатора;  $f_i$  – эквивалентный коэффициент трения, обусловленный трением качения ролика по слитку и трением в подшипниках опор роликов;  $P_{\Phi i}$  – усилие ферростатического давления на ролики;  $G_{Qi}$  – нормальная составляющая силы тяжести части слитка в межроликовом пространстве;  $G_{Ti}$  – тангенциальная или продольная составляющая силы тяжести слитка;  $G_{Pi}$  – сила тяжести  $i$ -го ролика;  $P_{Ppi}$  – усилие давления на ролик, обусловленное правкой слитка на криволинейном участке ЗВО;  $P_{Tpi}$  – усилие давления на ролики от температурных поволодок непрерывнолитой заготовки;  $F_{BМi}$  – усилие сопротивления вытягиванию выпученной корки заготовки из  $i$ -й пары роликов;

– анализ распределения статических продольных усилий в слитке вдоль ЗВО для различных ручьев МНЛЗ № 1–4 ОАО “ММК” показал, что на различных ручьях, находящихся в иден-

тичных технологических условиях, распределение продольных усилий в слитке по абсолютной величине и характеру изменения вдоль ЗВО значительно отличаются друг от друга. На горизонтальном участке в зоне закрытия жидкой фазы обнаружены значительные изменения максимальных значений натяжения в слитке от 186 до 622 кН. Кроме этого, на радиальном и криволинейном участках возможно образование подпора в слитке;

– между показателями неравномерности распределения токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов первой группы горизонтального участка (коэффициента вариации  $v_{ГОР}$ ) и показателями качества осевой зоны слитка имеет место тесная корреляционная связь. При этом чем выше показатели неравномерности  $v_{ГОР}$ , тем выше относительная частота снижения сортности литой заготовки по осевым трещинам и осевой рыхлости (коэффициенты парной корреляции  $R$  составили соответственно 0,93 и 0,75).

Кроме этого существует тесная корреляционная связь на радиальном, криволинейном и горизонтальном участках ЗВО между показателями статических продольных усилий в слитке на участках и частотой возникновения перпендикулярных и гнездообразных трещин. Причем, чем выше показатели величины продольных усилий в слитке, тем выше частота возникновения трещин (коэффициенты парной корреляции соответственно составили 0,88, 0,92 и 0,77);

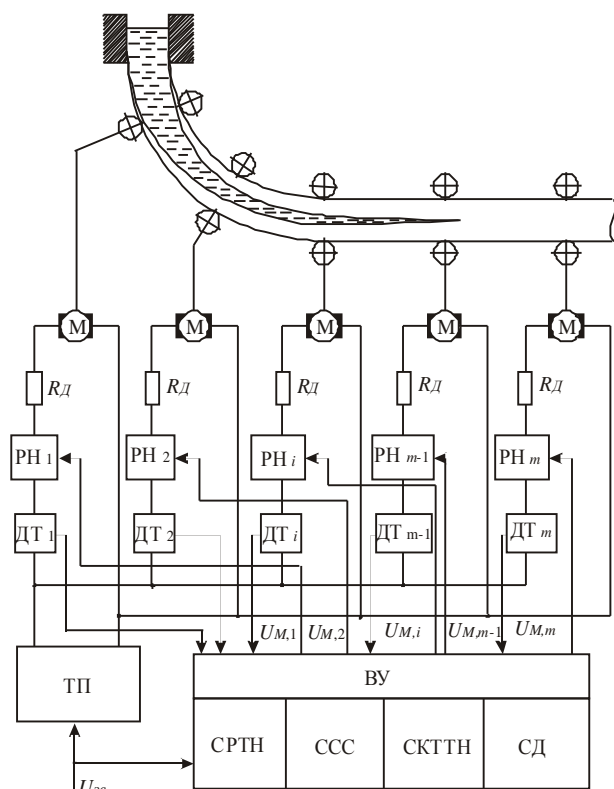
– колебательное изменение скорости литья заготовки приводит к ухудшению качества макроструктуры литой заготовки по всем шести видам дефектов, учет которых ведется на МНЛЗ ОАО «ММК»;

– исследование на разработанной динамической модели электропривода ТПУ с учетом реальных параметров упругой связи тянущие ролики – электродвигатель и фрикционной связи тянущие ролики – слиток показали, что причиной колебаний общего тока нагрузки электропривода ТПУ и скорости литья заготовки является случайное появление гармонической составляющей в моменте сопротивления вытягиванию слитка. Прогиб бочки тянущих роликов и их периодические и случайные буксовки приводят к образованию в заготовке значительных дополнительных динамических продольных усилий. Износ тянущих роликов в применяемой системе электропривода ТПУ без возможности индивидуального регулирования электроприводов роликов вызывает заметное изменение усилия вытягивания относительно первоначально заданного значения и увеличение статических продольных усилий в слитке.

Приведенные исследования позволили определить конкретные технологические требования к электроприводу ТПУ и его системе управления по участкам ЗВО с позиций улучшения качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок за счет снижения неравномерности распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов, снижения максимальных значений статических и динамических продольных усилий в слитке и стабилизации скорости разливки при появлении гармонической составляющей в моменте сопротивления вытягиванию заготовки.

В соответствии с разработанными технологическими требованиями обоснован выбор и предложены три варианта реализации силовой части электропривода ТПУ с целью снижения максимальных значений статических продольных усилий в отливаемой заготовке и равномерного распределения нагрузок по электродвигателям тянущих роликов на участках ЗВО:

- 1) индивидуальный электропривод тянущих роликов;
- 2) групповой электропривод всех тянущих роликов с активными регуляторами нагрузки в якорных цепях каждого электродвигателя тянущего ролика (см. рисунок). Регуляторы нагрузки предложено выполнить по принципу широтнымпульсной модуляции;



Структурная схема электропривода ТПУ

3) групповой электропривод тянущих роликов радиального, криволинейного и двух групп горизонтальных участков ЗВО от четырех тиристорных преобразователей с включением в якорные цепи электродвигателей радиального, криволинейного и первой группы горизонтальных участков ЗВО активных регуляторов нагрузки.

Разработка предлагаемых технических решений электропривода ТПУ выполнена в рамках программы реконструкции действующих МНЛЗ № 2–3 ОАО «ММК» с целью повышения качества макроструктуры литых заготовок и повышения производительности МНЛЗ.

Техническое решение (см. рисунок) принято к внедрению на МНЛЗ ОАО «ММК».

Разработан общий алгоритм управления электроприводом ТПУ для технологических условий литья заготовки на МНЛЗ ОАО «ММК» (СРТН). В алгоритме предусмотрена возможность компенсации гармонической составляющей общего момента вытягивания слитка при появлении автоколебаний скорости литья заготовки, превышающих требуемую точность её стабилизации (СК). Также учтена необходимость коррекции требуемых значений токов (моментов) нагрузки с учетом текущего состояния тянущих роликов и коррекции их числа в соответствии с точностью выставки тянущих роликов по технологической оси ЗВО и исправностью электрического и механического оборудования линий привода тянущих роликов (СКТН). В состав системы управления электроприводом ТПУ включена система диагностики текущего состояния и настройки оборудования роликовой проводки (СД).

СРТН обеспечивает расчет и поддержание требуемого по технологии относительного распределения общего момента вытягивания слитка по группам электродвигателей радиального, криволинейного и двух групп горизонтальных участков ЗВО с целью снижения максимальных значений статических продольных усилий в слитке, расчет и поддержание относительного распределения момента нагрузки группы электродвигателей по электродвигателям тянущих роликов с целью снижения неравномерности распределения токов нагрузки.

Алгоритм СКТН обеспечивает стабилизацию усилия вытягивания слитка на контакте ролик – слиток при наличии прогиба и износа тянущего ролика и ограничение динамических продольных усилий в слитке при появлении периодических и случайных бросков приводов тянущих роликов.

Алгоритм СД обеспечивает стабилизацию скорости литья заготовки при появлении колебательной составляющей в общем моменте сопротивления вытягиванию слитка.



Разработан общий алгоритм и алгоритмы отдельных функций системы диагностики (СД) текущего состояния тянущих роликов, контроля точности их выставки вдоль технологической линии ЗВО и исправности электрического и механического оборудования линий привода тянущих роликов. Предложенная система диагностики отличается от известной увеличением выполняемых функций диагностики с 5 до 10.

Система управления электроприводом ТПУ (см. рисунок) внедрена на МНЛЗ № 3 ОАО

«ММК». Внедрение системы обеспечило за счет снижения максимальных значений статических продольных усилий в слитке в 4 раза, снижения неравномерности распределения токов нагрузки на 50% и стабилизации скорости литья заготовки в пределах  $\pm 2\%$  от заданного значения увеличить скорость разлива на 5% при улучшении качества макроструктуры заготовок в среднем на 10%.

Фактический годовой эффект от внедрения составил 22 млн руб.

#### Библиографический список

1. Лукьянов С. И. Электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 100 с.
2. Лукьянов С. И., Белый А.В., Швидченко Д.В. Стабилизация технологических параметров вытягивания непрерывнолитого слитка электроприводом тянущих роликов: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 141 с.
3. Лукьянов С. И., Васильев А.Е., Лукьянов Д. С. Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 179 с.

УДК 621.74.06.62-83

Ю.А. Кирпичников, А.А. Николаев

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВЫХОДНОЙ ЗОНЫ АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ ОАО «ММК»

По завершении технологического процесса цинкования полоса сматывается моталкой в рулон для последующего складирования и отгрузки. Переход полосы с одной моталки на другую связан с рядом операций при пониженной (заправочной) скорости ее передвижения. Минимальное время цикла смены моталки включает в себя затраты на следующие операции: замедление полосы от технологической скорости до заправочной; подвод необходимого участка полосы к ножницам; порез полосы выходными гильотинными ножницами с вырезкой участка сварки и образцов, а также возможного брака на концах полосы; протяжка переднего конца на заправочной скорости до свободной моталки и его заправка на барабан; разгон полосы до максимальной скорости выходной секции с целью снижения запаса в выходном накопителе до минимального; переход на технологическую скорость передвижения оцинкованной полосы в выходной зоне.

Перечисленные выше операции выполняются в автоматическом режиме, но при необходимости возможно ручное управление заправкой конца полосы в моталку. При этом все операции, в зависимости от сортамента, укладываются в минимальное время 100–200 с при минимальном

времени работы выходной зоны на пониженной скорости до 90 с.

Цикл смены моталок обеспечивается соответствующей и согласованной работой выходного накопителя полосы, назначением которого является строгое сохранение неизменным заданного натяжения и скорости полосы в технологической зоне.

Выходной накопитель представляет собой вертикальную петлевую систему, основной частью которой является передвижная платформа с роликами (рис. 1). При перемещении платформы вверх или вниз изменяется объем накопленной полосы согласованно с заданными натяжением и скоростью полосы в технологической зоне. До начала смены моталок выходной накопитель имеет минимальное заполнение от 30 до 70% к максимальной емкости в зависимости от сортамента.

При подаче команды на смену моталок начинается замедление полосы в выходной зоне от технологической скорости до заправочной за счет передвижения платформы накопителя вверх со скоростью, соответств

ующей разности скоростей полосы до и после накопителя. Начинается процесс накопления полосы в выходном накопителе.