

Лукьянов С.И.¹, Швидченко Д.В.^{1,2}, Пишнограев Р.С.^{1,2}, Швидченко Н.В.^{1,2}, Красильников С.С.^{1,3}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

² ООО «ТЕХНОАП Инжиниринг»

³ ООО «ММК-Информсервис»

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ПРИ ДЕФОРМАЦИИ БОЧЕК РОЛИКОВ

Приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований электроприводов тянущих роликов и их влияния на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок промышленных машин непрерывного литья заготовок. Доказано, что деформация бочек тянущих роликов, а именно износ и прогиб их бочек и возникающие вследствие этого периодические и случайные буксовки приводов создают в кристаллизующейся заготовке дополнительные статические и динамические продольные усилия, появление которых неизбежно приводит к снижению качества заготовок. Приведены методики и аналитические зависимости оценки влияния электроприводов тянущих роликов с деформацией их бочек на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок. Определены новые технологические требования к электроприводу тянущих роликов и системе его управления с позиций улучшения качества макроструктуры заготовок за счет целесообразного управления параметрами электроприводов. Разработаны алгоритмы управления электроприводами, позволяющие реализовать новые технологические требования. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанных технических решений.

Ключевые слова: электропривод машины непрерывного литья заготовок, усилия вытягивания, качество непрерывнолитой заготовки, тянущие ролики, стабилизация усилия вытягивания.

ВВЕДЕНИЕ

Основным способом получения заготовок для листового и сортового проката на ближайшие десятилетия остается способ разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок. При непрерывной разливке существенно снижаются расход электрической энергии и топливно-энергетические затраты, снижается себестоимость продукции и значительно повышается выход годного металла из жидкой стали. С каждым годом в черной металлургии растет количество машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и объем выпускаемой непрерывнолитой заготовки [1]. Технология непрерывной разливки стали, конструкция машин [1, 2], их электропривод и системы автоматизации [3–9] постоянно совершенствуются в направлении повышения качества отливаемых заготовок и производительности каждой машины. Однако из-за особенностей технологии непрерывной разливки стали в теле заготовки образуются специфические дефекты ее макроструктуры [1, 2]. Наличие этих дефектов является причиной ограничения скорости литья заготовки и производительности МНЛЗ [10].

Одной из причин снижения качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки являются дополнительные продольные усилия, создаваемые в слитке электроприводами тянущих роликов в результате неизбежных для технологии непрерывной разливки стали износа и прогиба бочки роликов, а также буксовок электроприводов тянущих роликов [10].

В настоящее время недостаточно освещены вопросы влияния режимов работы электроприводов тянущих роликов (ЭТР) на процесс формирования дополнительных

продольных усилий в отливаемой заготовке при возникновении деформации бочки тянущих роликов (ТР). Отсутствует оценка статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР при износе и прогибе их бочки и буксовках приводов.

Цель исследования: улучшение качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки за счет ограничения статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР при износе и прогибе бочки ТР и случайных и периодических буксовках приводов.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ МНЛЗ

Типовые технические решения конструкции роликовой проводки МНЛЗ, условий ее эксплуатации и ЭТР рассмотрены на примере МНЛЗ крупного металлургического предприятия Российской Федерации. Технологический канал зоны вторичного охлаждения МНЛЗ криволинейного типа разделен на три участка (**рис. 1**): радиальный участок, выполненный по дуге окружности с базовым радиусом R_b ; криволинейный участок, построенный по специальной кривой с постоянно увеличивающимся радиусом кривизны от R_b до бесконечности, обеспечивающий разгиб заготовки; горизонтальный участок.

Роликовая проводка ЗВО состоит из неприводных и большого числа (до 70) распределенных вдоль технологической линии ЗВО приводных удерживающих роликов (**рис. 1**). В роликовой проводке ЗВО каждого ручья установлено по 98 пар роликов в верхнем и нижнем рядах. При этом все ролики верхнего ряда выполнены неприводными, а в нижнем ряду располагаются как приводные (тянущие), так и неприводные ролики. Применяют ролики трех номинальных диаметров: 240, 270 и 330 мм.

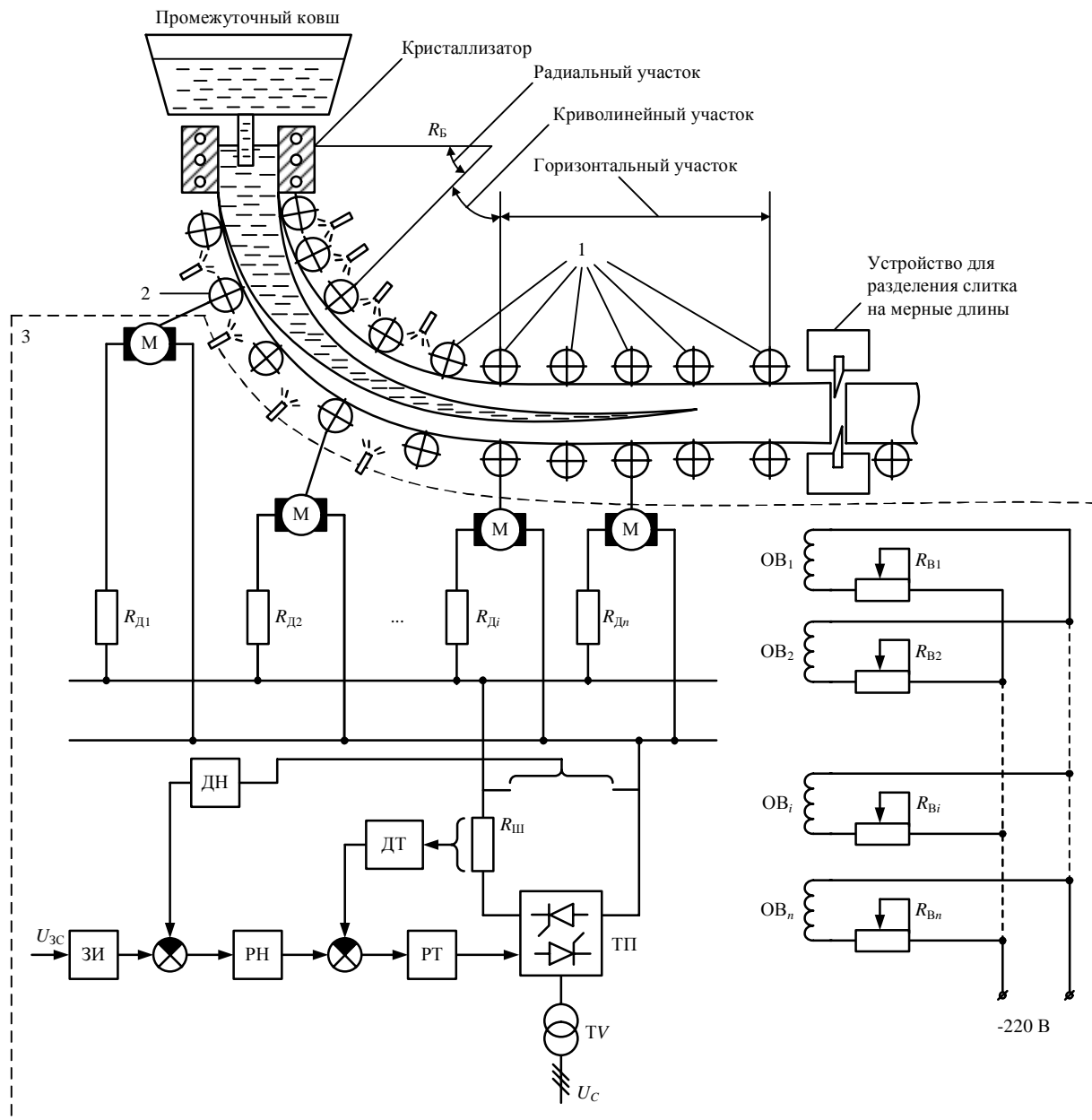


Рис. 1. Функциональная схема построения криволинейной МНЛЗ и электропривода ТР:
 1 – группа неприводных роликов; 2 – группа приводных роликов; 3 – электропривод тянущих роликов

Характерной и неизбежной особенностью эксплуатации роликовой проводки ЗВО является наличие деформации тянущих роликов МНЛЗ, которая проявляется в износе и прогибе их бочки. Обусловлено это высокой температурой на контакте ролик-слиток (до 1300°C), действием значительных усилий ферростатического давления жидкой стали (до 500 кН) и технологическим требованием применения роликов малого диаметра для ограничения выпучивания корки кристаллизующегося слитка в пространство между роликами [1].

На **рис. 1** приняты обозначения: ЗИ – задатчик интенсивности; ДН – датчик напряжения; РН – регулятор напряжения; РТ – регулятор тока; ТП – тиристорный преобразователь; ДТ – датчик тока; ТВ – трансформатор; R_B – базовый радиус; R_{Di} – дополнительное сопротивление в опорной цепи, Ом; R_{Bi} – дополнительное сопротивление в возбуждении, Ом; OB_i – обмотка возбуждения; n – количество приводных роликов; U_{3C} –

напряжение задания скорости, В; U_C – напряжение сети, В; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, В.

Износ и остаточный прогиб бочек ТР, достигающие 10 и 5 мм соответственно, вызывают периодические и случайные буксовки ЭТР на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО. При этом наблюдаются значительные колебания токов нагрузки ЭТР [11].

Деформация ТР отрицательно сказывается на качестве макроструктуры непрерывнолитых заготовок. При этом традиционно улучшение качества заготовок связывается с увеличением стойкости тянущих роликов. Однако при больших материальных затратах на разработку новых марок стали для роликов и способов их изготовления кардинально решить вопрос об исключении деформации тянущих роликов в процессе эксплуатации МНЛЗ не удастся [6].

Одним из основных требований к ЭТР является ограничение растягивающих продольных усилий в обложке кристаллизующегося слитка за счет рассредоточения

приводных элементов по всей технологической линии, автономного регулирования токов нагрузки групп ЭТР и индивидуального регулирования эквивалентных за два оборота ТР значений токов нагрузки электродвигателей горизонтального (до смыкания фронтов кристаллизации в слитке) участка ЗВО [1, 3, 5, 9].

В большинстве отечественных и зарубежных МНЛЗ применяется электропривод постоянного тока с силовым питанием всех электродвигателей от одного до четырех тиристорных преобразователей (ТП) (рис. 1). На новых МНЛЗ принимается схема индивидуального электропривода ТР. Системы управления ЭТР строятся без возможности индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки и частот вращения электродвигателей ТР.

Анализ причин образования дефектов непрерывнолитых слябов показал, что из всего многообразия факторов, определяющих качество литой заготовки, весьма недостаточно рассмотрены вопросы влияния ЭТР при условии деформации их бочки, формирующих в слитке дополнительные продольные усилия, которые являются одной из причин образования дефектов [1, 2].

С целью оценки степени влияния деформации ТР на показатели качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок на действующих МНЛЗ проведен промышленный эксперимент. В ходе эксперимента:

- в межремонтный период времени штатно с готовых заготовок изготавливались пробы металла и исследовали в макротемплетной лаборатории предприятия;
- оценка степени развития дефектов выполнялась по бальной шкале от 0 до 4 баллов по следующим видам дефектов макроструктуры: гнездообразные, перпендикулярные и осевые трещины, осевая рыхлость;
- для каждой пробы металла фиксировался номер дня от даты запуска МНЛЗ после выполнения ремонтных работ.

Условия эксперимента: исследования проводились на идентичных по конфигурации роликовой проводки, технологии разливки стали и охлаждения металла в ЗВО и кристаллизаторе машинах; пробы металла на анализ качества отбирались только с идентичных по химическому составу заготовок, отлитых на стабильной скорости 1 м/с; такие механические неисправности, как поломки роликов и узлов в их линиях привода, а также выход из строя электродвигателей, оперативно устранялись. Объем выборки составил 80 проб металла. По каждому виду дефекта построены уравнения регрессии зависимости степени развития каждого вида дефекта как функции времени и значения коэффициента парной корреляции между числовыми показателями длительности работы МНЛЗ и показателями качества макроструктуры заготовки.

Экспериментальные исследования показали, что фактор состояния роликового аппарата ТР наряду с факторами металлургического, теплотехнического и механического характера оказывает существенное влияние на процесс формирования макроструктуры литой заготовки. Установлена тесная корреляционная связь между показателем длительности работы МНЛЗ в периоды между ремонтами и показателями качества по гнездообразным и перпендикулярным трещинам и осевой рыхлости (коэффициенты парной корреляции R составили соответственно 0,31; 0,16 и 0,19).

Таким образом, по мере деформации бочек ТР происходит снижение качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки по трем видам дефектов. Причиной такого снижения качества макроструктуры является формирование ЭТР в теле заготовки дополнительных продольных усилий [10].

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ПРИ УСЛОВИИ ДЕФОРМАЦИИ ИХ БОЧКИ НА КАЧЕСТВО МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

Исследование износа ΔD тянущих роликов ЗВО МНЛЗ показало, что наибольшему износу до 8 мм подвержены ТР криволинейного и первой секции горизонтального участков ЗВО.

Авторами предложена методика оценки влияния режимов работы ЭТР при износе их бочки на изменение усилия вытягивания ΔF заготовки на контактах с ТР и величину статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР:

1) по разработанным математическим зависимостям определяются изменения токов нагрузки и усилий вытягивания на контактах тянущих ролики – слиток с учетом текущего износа тянущих роликов:

$$\Delta I = \frac{i_r \beta}{(c\Phi)} \cdot \frac{2V_{PB} \Delta D}{D_r (D_r - \Delta D)}; \quad (1)$$

$$\Delta F = 2(c\Phi) i_r \frac{\Delta I}{D_r - \Delta D}, \quad (2)$$

где β – жесткость механической характеристики электропривода тянущего ролика, Н·м·с; i_r – передаточное число редуктора; V_{PB} – скорость вытягивания заготовки, м/с; D_r – диаметр тянущего ролика, м; ΔD – величина износа бочки тянущего ролика, м; c – конструктивная постоянная; Φ – магнитный поток, В·с; I – ток нагрузки, А;

2) по механическим характеристикам ЭТР при условии неизменности общего тока электропривода ТР и скорости вытягивания заготовки определяется перераспределение токов нагрузки электродвигателей ТР в соответствии с текущими значениями износа их бочки;

3) по известной математической модели [9,12] выполняется расчет статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе их бочки.

Установлено, что ЭТР, работающие в условиях износа их бочки, вызывают в слитке изменение величины продольных усилий до 53 % (рис. 2).

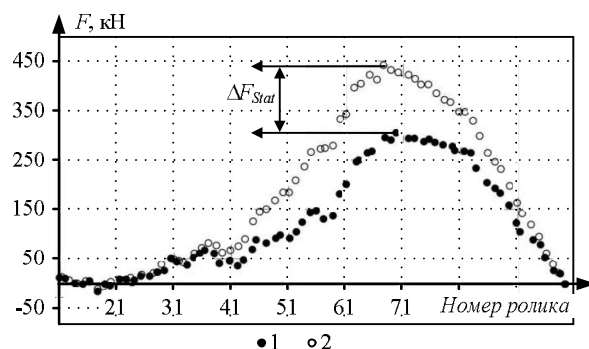


Рис. 2. Распределение статических продольных усилий в заготовке вдоль ЗВО: 1 – без износа тянущих роликов; 2 – с учетом износа тянущих роликов

На рис. 2 введены обозначения: F – статическое продольное усилие, создаваемое электроприводами ТР в отливаемой заготовке, Н; ΔF_{Stat} – изменение статического продольного усилия, создаваемого электроприводами ТР в отливаемой заготовке, Н.

В результате исследования по разработанной методике определено, что износ ΔD тянущих роликов существенно влияет на изменение усилия вытягивания слитка ΔF на контакте ТР-слиток, которое формируется ЭТР. Установлено, что максимальное изменение величины ΔF наблюдается на ЭТР диаметром 330 мм. Так, например, при износе тянущего ролика $\Delta D = 8$ мм на скорости вытягивания заготовки 1 м/мин изменение величины усилия вытягивания слитка ΔF на контакте ТР-слиток составляет более 30% (рис. 3).

Аналитические зависимости (1) и (2) позволили определить граничные значения износа ΔD_B , превышение которых вызывает изменение усилия вытягивания слитка и величины статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе их бочки, более 5%. Получены зависимости ΔD_B для роликов различного диаметра в диапазоне скоростей от 0,5 до 1 м/мин.

Установлено, что если в процессе эксплуатации МНЛЗ по мере износа ТР поддерживать значения токов нагрузки ЭТР на неизменном уровне ($I = \text{const}$), то изменение усилия вытягивания ΔF на контакте этих ТР со слитком не превышает 2,2%.

Определено требование к ЭТР: ЭТР радиального, криволинейного и горизонтального участков ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при наличии износа ТР более граничных значений ΔD_B с целью стабилизации усилия вытягивания слитка на контакте ТР-слиток и ограничения статических продольных усилий в отливаемой заготовке.

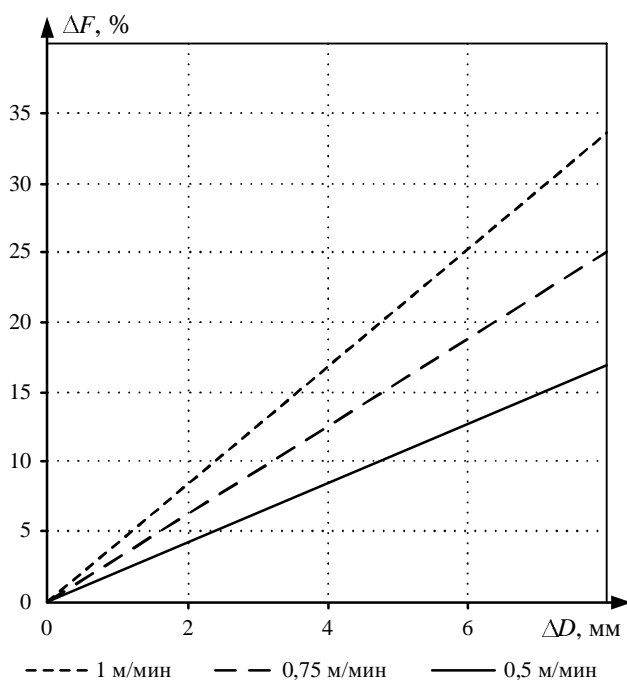


Рис. 3. Изменение усилий вытягивания слитка

АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ УСИЛИЯ ВЫТЯГИВАНИЯ СЛИТКА

В результате статистического анализа временных диаграмм токов нагрузки электродвигателей ТР в режиме работы ЭТР на установившейся скорости разливки установлено, что на части электродвигателей ТР имеют место явно выраженные, устойчивые за цикл разливки, колебания токов нагрузки (рис. 4). При этом существенных изменений в скорости разливки и суммарном токе ЭТР не наблюдается.

Исследование периодов основных колебаний мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей ТР показало, что в случае колебательного характера изменения тока нагрузки с резкими фронтами изменения, учитывая, что величина тока за цикл вращения ролика достигает значений тока холостого хода, между ТР и слитком происходит периодический срыв и восстановление контакта, т.е. происходит периодическая буксовка ЭТР. Кроме периодических, на электродвигателях ТР криволинейного и горизонтального участков ЗВО наблюдаются также и случайные буксовки электроприводов, имеющие различную продолжительность. Колебательное изменение токов нагрузки электродвигателей близкое по форме к синусоидальному вызвано прогибом бочки тянущего ролика. При этом мгновенные значения токов нагрузки этих электродвигателей за цикл вращения ТР не снижаются до величины токов холостого хода. Следовательно, контакт между ТР и слитком непрерывный.

Задача исследования влияния режимов работы ЭТР при прогибе их бочки, достигающего 5 мм, на изменение усилий вытягивания на контактах ролик-слиток и величину динамических продольных усилий в отливаемой заготовке потребовала построения методики, определяющей взаимосвязь прогиба бочки ТР и величины динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР:

1) рассматривается величина изменения угловой скорости вращения электродвигателя ТР за один оборот ролика:

$$\Delta \omega_{mot} = \frac{2i_p \delta V_{st}}{R^2 - \delta^2};$$

2) по разработанным математическим зависимостям [16] определяются изменения за один оборот ТР токов нагрузки электродвигателей и усилий вытягивания слитка, вызванные ЭТР роликов при прогибе их бочки:

$$\Delta I = \frac{2i_r \delta \beta V_{PB}}{c\Phi(R^2 - \delta^2)}; \quad (3)$$

$$\Delta F = i_r c\Phi \left(\frac{\Delta I}{R + \delta} - \frac{\beta}{c\Phi} \cdot \frac{B \Delta \omega_{mot}}{R - \delta} \right), \quad (4)$$

где β – жесткость механической характеристики электропривода тянущего ролика, Н·м·с; i_r – передаточное число редуктора; V_{BP} – скорость литья заготовки, м/мин; R – радиус тянущего ролика, мм; δ – величина прогиба бочки тянущего ролика, мм; $B = 0,056$ – коэффициент, определенный эмпирическим путем.

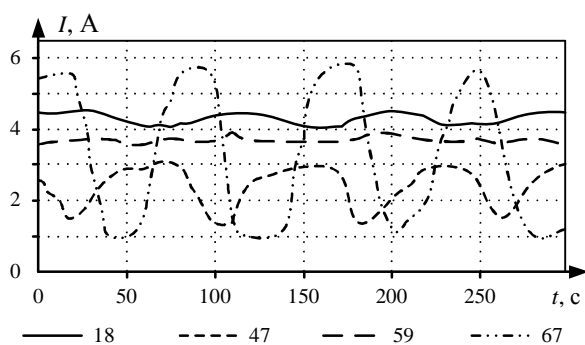


Рис. 4. Временные диаграммы токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов в режиме работы электропривода на установившейся скорости разливки: 18, 47, 59, 67 – номера двигателей тянущих роликов

Прогиб бочки δ ТР вызывает существенное колебательное изменение токов нагрузки $I(t)$ электродвигателей, по форме соответствующее реальным изменениям тока, и значимое изменение за один оборот ролика усилия вытягивания слитка $F(t)$, формируемого ЭТР (рис. 5). Например, на скорости литья заготовки $V = 0,75$ м/мин при прогибе ролика радиусом $R = 165$ мм на $\delta = 5$ мм изменение усилия ΔF относительно среднего значения F_{av} составит $\Delta F = 25$ кН (71 %).

На рис. 5 введены обозначения: F_{av} – среднее значение усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н; I_{av} – среднее значение тока нагрузки за период вращения тянущего ролика, А; F_1, F_2 – соответственно наибольшее и наименьшее значения усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н; ΔI_a – амплитуда изменения

тока нагрузки, А; ΔF – диапазон изменения усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н.

В результате исследований по разработанной методике установлено, что ЭТР при прогибе их бочки заметно (до 105 % от заданного среднего значения) влияют на величину усилий вытягивания слитка на ее контактах с ТР (рис. 6). Кроме того, ЭТР при прогибе их бочки создают существенные динамические нагрузки (до 55 кН). Поэтому пренебрегать электромеханическими явлениями на контакте деформированного ролика со слитком недопустимо. Под электромеханическими явлениями понимается реакция ЭТР на прогиб его бочки, проявляющаяся как изменение усилия вытягивания слитка.

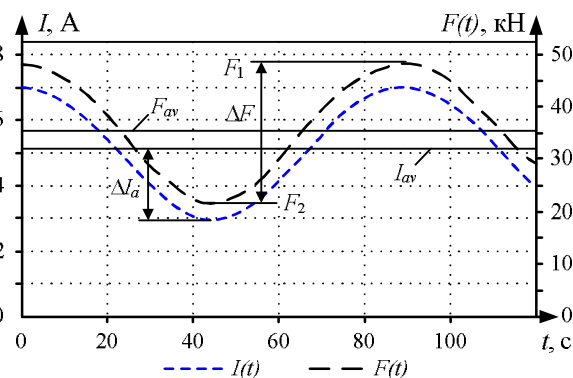


Рис. 5. График изменения тока и усилия вытягивания слитка при прогибе бочки тянущих роликов

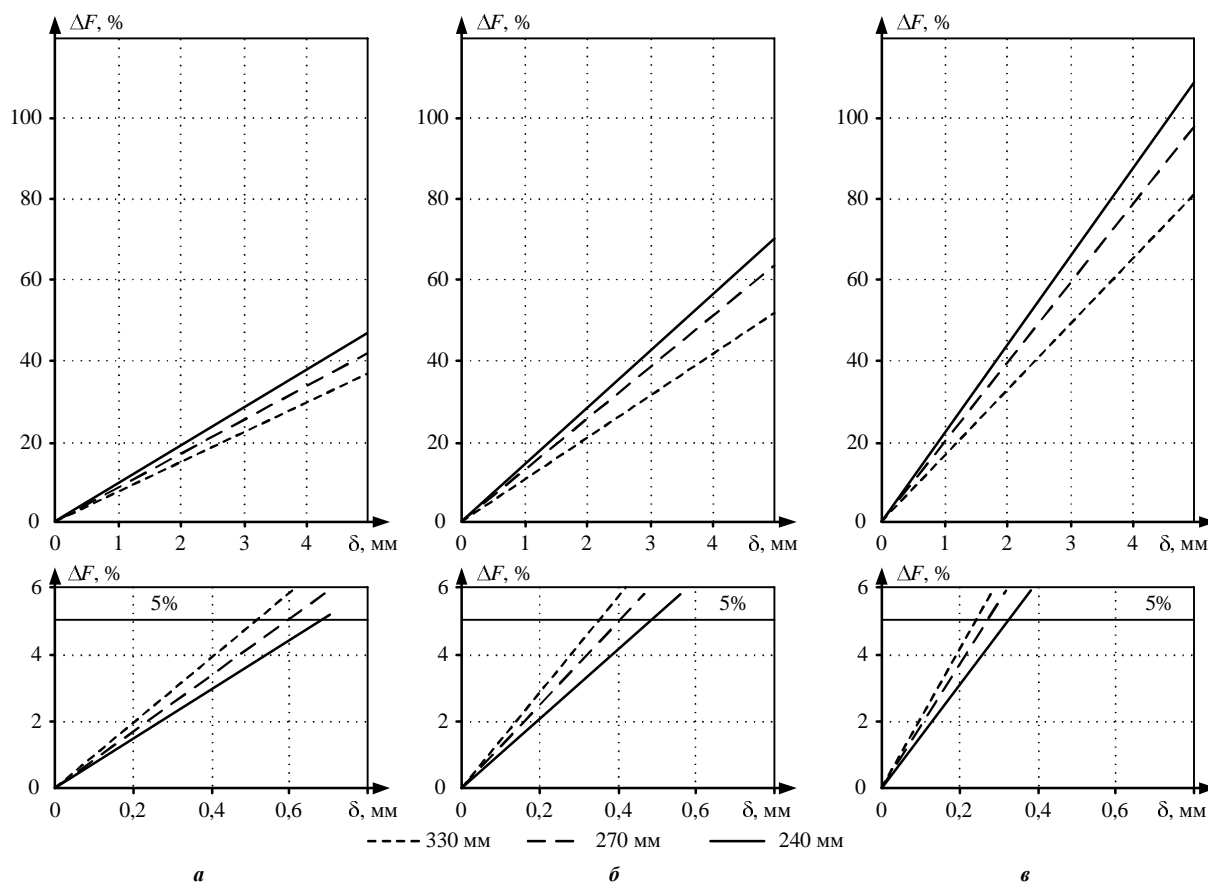


Рис. 6. Графики изменения динамических продольных усилий в функции прогиба бочки тянущего ролика на скорости вытягивания заготовки: а – 0,5 м/мин; б – 0,75 м/мин; в – 1 м/мин

На основании аналитических зависимостей (3) и (4) определены граничные значения прогиба бочки тянущих роликов δ_B , повышение которых вызывают значимое (более 5 %) изменение усилия вытягивания слитка на контакте ТР-слиток и динамических продольных усилий, создаваемых ЭТР.

Установлено, что стабилизация мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей ТР на заданном уровне ($I = \text{const}$) при величине прогиба роликов диаметром $D_r = 240$ мм до 3,6 мм, $D_r = 270$ мм до 4,2 мм и $D_r = 330$ мм до 5 мм позволяет ограничить изменение усилия вытягивания в пределах 5%. Для полной стабилизации усилия вытягивания и сведения к нулю динамических продольных усилий в слитке необходимо принудительное изменение мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей относительно заданного значения (рис. 5) согласно зависимости

$$\Delta I'(t) = \frac{\beta B(R + \delta)}{(c\Phi) \cdot (R - \delta)} \Delta \omega_{\text{mot}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_p} t\right). \quad (5)$$

Периодические и случайные буксовки ЭТР возникают на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО.

Задача оценки влияния периодических и случайных буксенок ЭТР на величину динамических продольных усилий в слитке включает в себя следующие исследования: оценку величины динамического усилия (удара) в момент восстановления контакта между ТР и

слитком и определение величины динамических продольных усилий в слитке, вызванных случайным перераспределением усилия вытягивания слитка между электроприводами из-за их буксенок.

Исследованиями установлено, что при восстановлении контакта тянущих роликов со слитком в последнем электроприводами создаются существенные динамические (ударные) продольные усилия (до 100 кН). Наличие этих динамических продольных усилий в слитке приводит к снижению качества осевой зоны слитка.

Неконтролируемое колебательное изменение токов нагрузки I_i (рис. 7, а) в группе электродвигателей ТР горизонтального участка ЗВО создает в осевой зоне слитка дополнительные динамические продольные усилия (до 100 кН) (рис. 7, б). Экспериментально доказано, что в периоды времени отсутствия контакта между ТР и слитком возможна регулировка длительности низкого значения тока нагрузки за счет увеличения и уменьшения частоты вращения электродвигателя посредством изменения, например, напряжения на его якоре. Это позволяет регулировать фазы изменения токов нагрузки относительно друг друга (рис. 7, в), за счет чего более чем в 2 раза (рис. 7, г) снизить максимальные значения динамических продольных усилий в осевой зоне слитка, вызванные буксовками электродвигателей ТР. Разработаны математические выражения, позволяющие установить требуемый сдвиг фаз колебаний токов нагрузки электродвигателей [11].

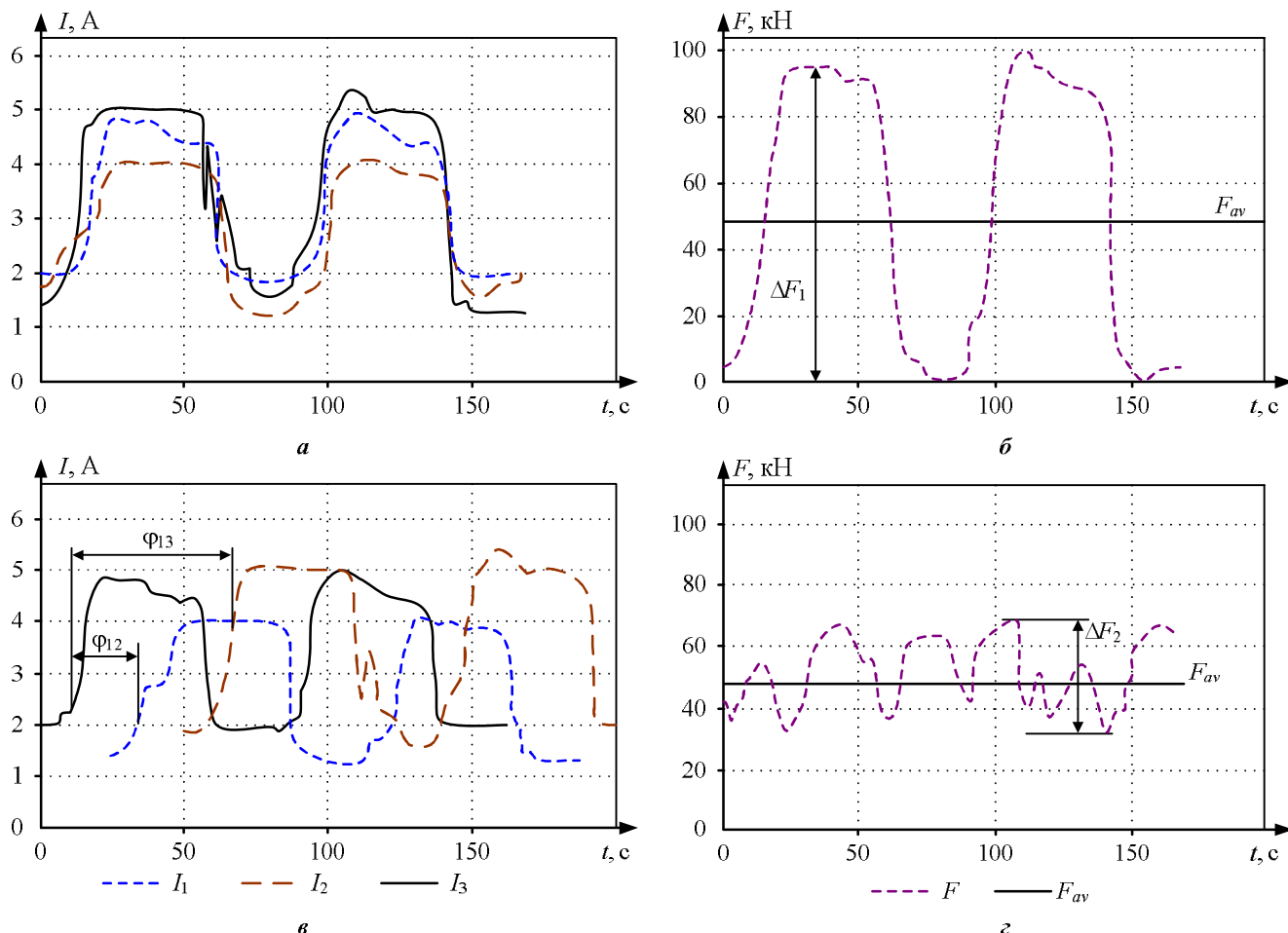


Рис. 7. Временные диаграммы: а, в – изменения токов нагрузки; б, г – продольных усилий в слитке

На **рис. 7** введены обозначения: $\Delta F_1, \Delta F_2$ – величины динамических продольных усилий, Н; φ_{12} – сдвиг фаз между изменениями токов I_1 и I_2 ; φ_{13} – сдвиг фаз между изменениями токов I_1 и I_3 .

Определены конкретные технологические требования к ЭТР и их систем управления по участкам ЗВО с позиций стабилизации усилия вытягивания слитка на его контакте с ТР и ограничения статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке:

1) ЭТР радиального участка ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при прогибе или износе бочки ТР более граничных значений или посредством их принудительного изменения относительно заданного среднего значения по разработанной зависимости при прогибе бочки ТР диаметром $D_r = 240$ мм более 3,6 мм и $D_r = 270$ мм более 4,2 мм.

2) ЭТР криволинейного и первой группы (в зоне закрытия лунки жидкой фазы) горизонтального участка ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования:

- мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при прогибе или износе бочки ТР более граничных значений;

- частот вращения электродвигателей ТР при появлении случайных и периодических буксовок ЭТР для ограничения ударных динамических нагрузок в заготовке при восстановлении контакта ролика-слиток и для регулировки по разработанной методике фаз колебательного изменения токов нагрузки групп электродвигателей.

3) ЭТР первой группы горизонтального участка ЗВО в зоне закрытия лунки жидкой фазы должны иметь возможность индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при условии неизменности контакта тянущий ролик – слиток.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ

В соответствии с разработанными технологическими требованиями обоснован выбор и предложены два варианта реализации силовой части ЭТР с целью ограничения статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке:

1) индивидуальный ЭТР;

2) групповой электропривод всех тянущих роликов с активными регуляторами нагрузки в якорных цепях каждого электродвигателя ТР (**рис. 8**).

На **рис. 8** введены обозначения: $PН$ – регуляторы нагрузки электродвигателей тянущих роликов; $ДТ$ – датчики тока электродвигателей; $ДН$ – датчик напряжения тиристорного преобразователя; $ВУ$ – вычислительное устройство.

Достоинством этого варианта реализации силовой части электропривода ТР является то, что внедрение данного варианта электропривода не требует значительных капитальных затрат на реконструкцию машинного зала действующей МНЛЗ. Регуляторы

нагрузки предложено выполнить по принципу широтно-импульсной модуляции. При этом регулирование скорости разливки и её стабилизацию выполняет тиристорный преобразователь, а регулирование токов нагрузки и угловых скоростей электродвигателей согласно разработанных требований выполняют регуляторы нагрузки. При выходе из строя одного или нескольких регуляторов нагрузки электродвигатель продолжит выполнять вытягивание заготовки с нерегулируемой нагрузкой на его валу до замены регулятора. Доказана возможность применения на радиальном участке ЗВО регулируемых источников тока (момента). Применение данного технического решения обусловлено надежностью контакта между тянущими роликами и слитком и естественным выполнением требования ограничения продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе и прогибе их бочки. Разработка предлагаемых технических решений ЭТР выполнена в рамках программы реконструкции действующих МНЛЗ с целью повышения качества макроструктуры литых заготовок и повышения производительности МНЛЗ.

Разработан общий алгоритм управления ЭТР, позволяющий непосредственно в ходе литья заготовки ограничивать статические и динамические продольные усилия в слитке за счет целесообразного управления ЭТР при прогибе или износе их бочки, «мягкого» восстановления контакта ролик-слиток и регулировки фаз колебательного изменения токов нагрузки групп электродвигателей при периодических и случайных буксовках электроприводов.

Разработан и апробирован алгоритм «мягкого» восстановления контакта ТР со слитком при случайных и периодических буксовках электроприводов, заключающийся в согласовании линейных скоростей ролика и слитка посредством снижения скорости вращения ролика с уровня $\omega_{\text{ХХ}}$ ($V_{\text{ХХ}}$) до уровня скорости движения слитка $V_{\text{РВ}}$ в периоды отсутствия контакта между ТР и слитком. При восстановлении контакта происходит увеличение нагрузки до прежнего уровня. Алгоритм обеспечивает ограничение ударных динамических нагрузок, создаваемых ЭТР при восстановлении контакта ТР-слиток.

Разработан и апробирован алгоритм регулировки фаз колебательного изменения токов нагрузки соседних электродвигателей ТР горизонтального участка ЗВО, включающий операции выделения первых гармоник колебаний токов нагрузки посредством разложения изменения мгновенных значений токов в ряд Фурье, определения требуемого сдвига фаз между изменениями токов с помощью математического аппарата векторной алгебры, регулирования фаз изменения токов электродвигателей в период времени отсутствия контакта между тянущими роликами и слитком согласно требуемых значений. Алгоритм обеспечивает ограничение динамических продольных усилий в осевой зоне заготовки, вызванных колебательным изменением токов нагрузки электродвигателей из-за периодических буксовок группы ЭТР.

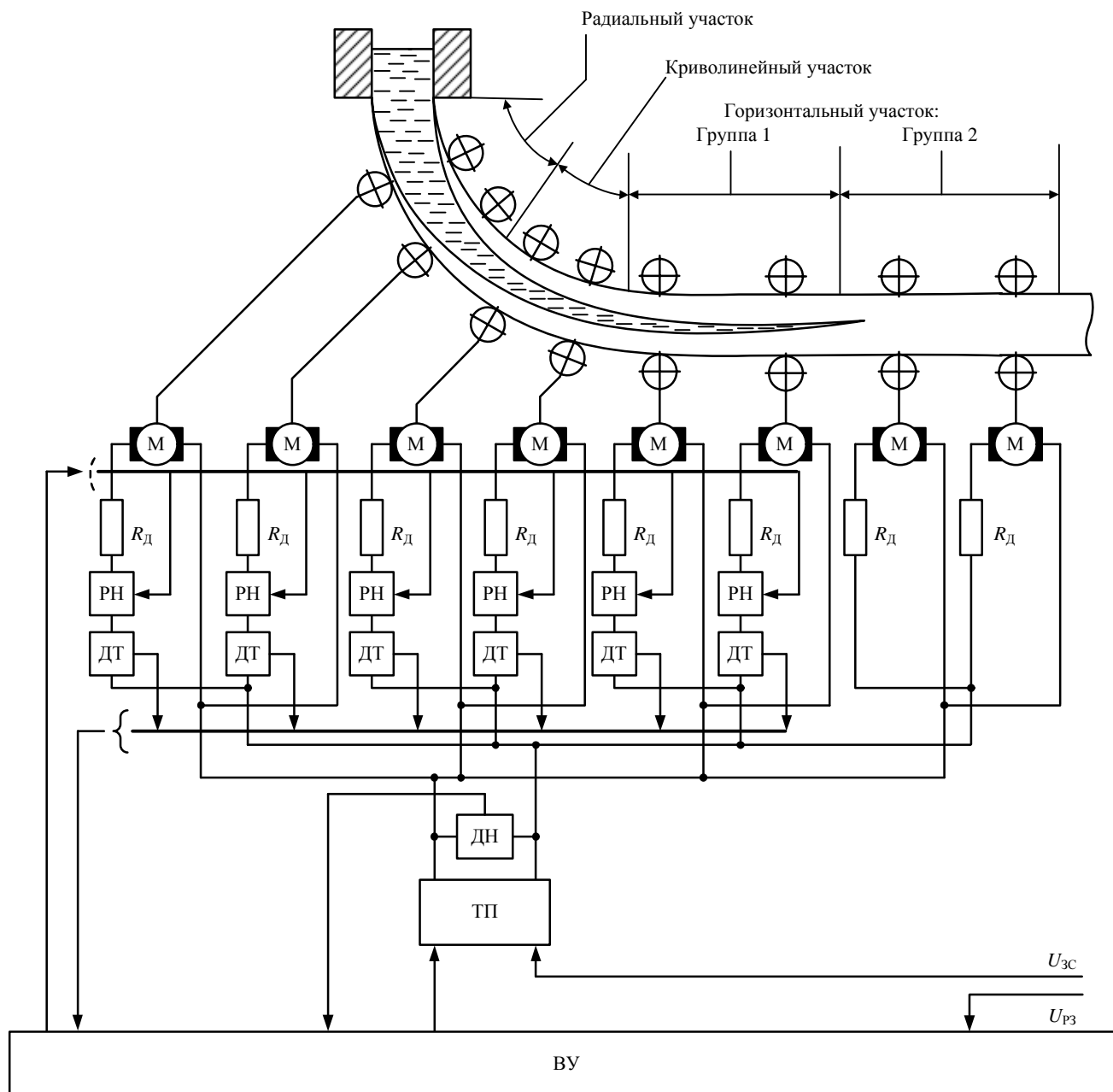


Рис. 8. Система автоматизации с групповым электроприводом тянущих роликов

Для оценки значимости влияния динамических (ударных) продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР, на качество макроструктуры литой заготовки проведен промышленный эксперимент. В ходе эксперимента в якорные цепи 15 электродвигателей ТР секций 9–11 (район формирования осевой зоны слитка) установлены транзисторные регуляторы нагрузки, выполняющие функции регулируемых сопротивлений. За счет уменьшения жесткости механических характеристик электродвигателей указанной группы ТР было выполнено уменьшение токов нагрузки. В результате на ряде электродвигателей колебания токов прекратились, на остальных электродвигателях уменьшилась амплитуда колебательного их изменения. После регулировки токов произошло уменьшение общих динамических продольных усилий в слитке со 100 до 30 кН и ударных динамических нагрузок со 180 до 60 кН.

При этом установлено, что за исследуемые интер-

валы времени после снижения динамических усилий в слитке на ручье 13–14 произошло улучшение качества по всем осевым видам дефектов в среднем на 8% при одновременном увеличении скорости разливки с 0,702 м/мин до 0,707 м/мин. При этом на контрольном ручье 15–16 МНЛЗ практически на неизменной скорости литья заготовки произошло снижение качества по показателям осевой рыхлости и осевой химической неоднородности, что свидетельствует о более тяжелых технологических условиях литья заготовки во второй период времени (после регулировки токов нагрузки электродвигателей).

Таким образом, в результате снижения динамических продольных усилий в слитке за счет уменьшения общей величины колебаний токов нагрузки электродвигателей секций 9–11 произошло улучшение качества макроструктуры осевой зоны непрерывнолитой заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований доказано:

1. Доказано, что дополнительные статические и динамические продольные усилия, создаваемые в кристаллизующейся заготовке электроприводом тянущих роликов по причине деформации бочки последних, негативно влияют на качество заготовок.
2. Предложены методики оценки влияния электроприводов тянущих роликов при деформации их бочки на изменение статических и динамических усилий.
3. Разработаны новые технологические требования к электроприводу тянущих роликов с целью уменьшения указанных усилий, а также технические решения, и алгоритмы их реализации.
4. Экспериментально доказана эффективность новых разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1(41). С. 27–30.
3. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987. 279 с.
4. Совершенствование электропривода тянущих роликов слябовых машин непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянов, Н.В. Фомин, А.В. Васильев, А.И. Хлыстов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №1(22). С. 18–22.
5. Пат. 2164836 Российской Федерации, МПК 7B22D 11/16. Устройство автоматического управления электроприводом зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья / Васильев А.Е., Лукьянов С.И., Лукьянов В.П. и др.; заявитель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Опубл. 10.04.2001.
6. Intelligent system for prediction of liquid metal breakout under a mold of slab continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. Vol. 79, Issue 9. Pp 1861–1868. DOI 10.1007/s00170-150-6945-1 (Scopus, Web of Science).
7. Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine // Luk'yanov S.I., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. Vol. 89, Issue 5. P. 1–13. DOI 10.1007/s00170-016-9224x (Scopus, Web of Science).
8. Diagnosis system for electric drive equipment of pinch rolls in continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S., Konovalov M.V. // 2016 9th International Conference of Power drives Systems, ICPDS 2016. DOI: 10.1109 / ICPDS.2016.7756722. (Scopus).
9. Improving the quality of continuously cast slabs: by means of the pinch roll drive of the horizontal part of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Vasiliev A.E., Logunova O.S., Karyakin A.L. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Volume 96 (1–4). P. 1–9. (Scopus, Web of Science).
10. Автоматизированная система контроля и управления МНЛЗ: монография / Д.Х. Девятков, С.И. Лукьянов, О.С. Логунова и др. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 640 с.
11. Швидченко Д.В. Ограничение продольных усилий в заготовке электроприводами тянущих роликов машины непрерывного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Швидченко Дмитрий Владимирович. Москва, 2003.
12. Лукьянов С.И. Оптимизация электропривода тянущего устройства по критерию качества непрерывнолитых заготовок: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / Лукьянов Сергей Иванович. Москва, 2003.

Поступила в редакцию 19 июня 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTINUOUS CASTER PULLING OUT ROLLS ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR THE CASE OF DEFORMATION OF ROLL BARRELS

Sergei I. Lukyanov

D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Electronics and Microelectronics, the Director of Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ieiac@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Vice Director of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Roman S. Pishnograev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Leading Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>

Nickolay V. Shvidchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «MMK-Informservice», Magnitogorsk, Russia. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

In this article, the results of experimental and analytical research of the electric drive of continuous casting machine and the way it affects the quality of the cast slabs are presented. It is shown that pulling roll barrels deformation, which is bending or wear, leads to the slabs quality reduction since the deformed roll barrels apply additional static and dynamic forces to the slab during crystallization process. The methods that make it possible to estimate the rolls defect influence on the slab quality are presented. As a research result the new technological demands to the continuous casting machine electric drive were designed and tested, which is described in the paper.

Keywords: continuous casting machine electric drive, pulling out strengths, continuous cast slab quality, pull out rolls, pulling out strength stability.

REFERENCES

1. Niskovskikh V.M., Karlinsky S.E., Berenov A.D. Continuous Slab Casters, Vol 292, Retrieved from www.scopus.com
2. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.H. The research of the quality of a continuous cast slab produced in a radial caster with the vertical part. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013. No.1(41) P. 27-30. (In Russian)
3. Margolin Sh. M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Continuous casting machines electric drive]. Metallurgy. 1987. 297 p. (In Russian)
4. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Vasilyev A.V. Khlystov A.I. Improvement of the continuous casting machines electric drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2014. No. 1(22). P. 18-22. (In Russian)
5. *Ustroystvo avtomaticheskogo upravleniya elektroprivodom zony vtorichnogo okhlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya* [The control system of a continuous casting machine secondary cooling zone electric drive] / Vasilyev A.E., Lukyanov S.I., Lukyanov V.P., Pat. No. 2164836 RF IC 7B22D 11/16. 2001.
6. Intelligent system for prediction of liquid metal breakout under a mold of slab continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. Volume 79, Issue 9. P. 1861–1868. DOI 10.1007/s00170-150-6945-1 (Scopus, Web of Science).
7. Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. Volume 89, Issue 5. P. 1–13. DOI 10.1007/s00170-016-9224x (Scopus, Web of Science).
8. Diagnosis system for electric drive equipment of pinch rolls in continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S., Kononov M.V. // 2016 9th International Conference of Power drives Systems, ICPDS 2016. DOI: 10.1109 / ICPDS.2016.7756722. (Scopus).
9. Improving the quality of continuously cast slabs: by means of the pinch roll drive of the horizontal part of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Vasiliev A.E., Logunova O.S., Karyakin A.L. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Vol. 96 (1–4). P. 1–9. (Scopus, Web of Science).
10. Devyatov D.Kh. Luk'yanov S.I., Logunov O.S. et.al. (2009) *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya MNLZ* [Automated control and control system for continuous casting machines]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009. 640 p.
11. Shvidchenko D.V. *Ogranichenie prodolnykh usilij v zagotovke elektroprivodami tyanuschikh rolikov mashiny nepreryvnogo litya*. Kand. Diss. [Limitation of longitudinal forces in slab by the pulling rolls electric drives. Ph.D.Diss.]. Shvidchenko D.V. Moscow, 2003.
12. Luk'yanov S.I. *Optimizatsiya elektroprivoda tyanushechpravilnogo ustroystva po kriteriyu kachestva nepreryvnolitykh zagotovok*. D.Sc. Diss. [Secondary cooling zone electric drive optimization by the criteria of slab quality. D.Sc. Diss.]. Luk'yanov S.I. Moscow, 2003.

Лукьянов С.И., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С., Швидченко Н.В., Красильников С.С. Система управления электроприводом тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок при деформации бочек роликов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 53-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-53-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-53-62)

Lukyanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V., Krasilnikov S.S. Continuous Caster Pulling out Rolls Electric Drive Control System for the Case of Deformation of Roll Barrels. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 53-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-53-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-53-62)