

УДК 621.822.6; 621.892.09

*Д.В. Терентьев, С.И. Платов,  
Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков*

## **РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СМАЗЫВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СЛЯБОВЫХ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

*D.V. Terentiev, S.I. Platov,  
Yu.V. Zhirkin, E.I. Mironenkov*

## **DEVELOPMENT OF RATIONAL MODES OF LUBRICATION OF BEARING UNITS SLAB CONTINUOUS CASTING MACHINES**

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования режима трения в контакте подшипниковых узлов роликной проводки машины непрерывной разливки слэбов в зависимости от типа смазочного материала, способа его доставки в узел трения и технологических параметров процесса литья. СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ; ПОДШИПНИКОВЫЙ УЗЕЛ; СИСТЕМА СМАЗЫВАНИЯ «МАСЛО-ВОЗДУХ».

The purpose of the work is the prognosis of friction mode in rolling contact of bearing units of roll guide slab continuous casting machine in dependence of lubricant type, method of its delivery to friction unit and technological parameters of casting.

LUBRICANT; THE BEARING ASSEMBLY; LUBRICATION SYSTEM «OIL-TO-AIR».

За сравнительно короткий период времени способ непрерывного литья заготовок получил широкое распространение в сталеплавильном производстве, коренным образом изменив процесс разливки и все металлургическое производство. Около 80 % мировой выплавки стали разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Большие мощности кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) требуют высокопроизводительных машин непрерывного литья заготовок для производства слэбов. Проблемы повышения производительности решаются увеличением скорости литья и коэффициента использования. Стойкость подшипниковых опор роликных секций напрямую влияет на коэффициент использования.

Прочность корочки слитка, выходящего из кристаллизатора, невелика, и поэтому для предупреждения ее выпучивания и разрыва за кристаллизатором устанавливают неприводную роликную проводку, снабженную продольными и поперечными роликами, расположенными на-

против четырех граней слитка. Как было уже отмечено, в первом этапе исследования на всех четырех МНЛЗ установлены по две неприводные роликные проводки с шарикоподшипниками № 212 (на МНЛЗ № 1, № 4) и роликподшипниками № 76–180512 (на МНЛЗ № 2, № 3). К неприводной роликной проводке (ее часто называют неприводной, или холостой, роликной секцией) предъявляются определенные требования, вытекающие из частых прорывов жидкого металла и необходимости точного расположения роликов по отношению к технологической оси машины, а именно: простота конструкции, высокая точность установки и возможность ее регулирования ( $\pm 0,3$  мм), возможность быстрой замены (не более 90 мин). Ниже неприводных проводок установлены приводные роликные проводки, предназначенные для предупреждения выпучивания корочки слитка, для перемещения слитка вдоль технологической оси машины и его выпрямления (правки). На МНЛЗ № 1 и № 4 — по 11 приводных роликных секций,

а на МНЛЗ № 2 и № 3 — по 9 приводных роликовых секций с различными двухрядными сферическими роликоподшипниками.

К приводной роликовой проводке предъявляются следующие требования, вытекающие из наличия жидкой фазы в слитке и условий работы машины:

вытягивание слитка должно осуществляться с возможно наименьшими усилиями на корку со стороны роликов;

перегрузки роликов при вытягивании и разгибании охлажденного слитка и пропуске наплывов на его поверхности должны быть сведены к минимуму;

конструкция проводки должна обеспечивать уборку остывшего слитка кусками не менее трех метров в случае возникновения аварии и замену секции в кратчайшее время.

На пути движения в роликовой проводке слиток подвергается интенсивному охлаждению водой, подаваемой форсунками.

Высокие температуры и вода оказывают влияние на уплотнительные узлы подшипниковых опор роликов в роликовых секциях, что приводит к нарушению требований, предъявляемых к роликовым проводкам. Выполнить данные требования возможно лишь при соблюдении технологического процесса и достаточного смазывания подшипниковых опор смазочным материалом.

Приняв допущение о том, что в зоне контакта подшипников качения работает минеральное масло (составляющая часть пластичного смазочного материала), можно рассчитать толщину масляной пленки в зоне контакта.

Угол действия нагрузки в подшипниках роликовых секций составляет 8–20°.

Известно [1, 2], что в условиях контактногидродинамической смазки существенное влияние на перераспределение гидродинамического давления оказывает параметр скорости —  $\bar{U}$ :

$$\bar{U} = \frac{\eta_0 U}{ER}. \quad (1)$$

Следовательно, в данном случае только изменение вязкости ведет к изменению параметра скорости  $\bar{U}$ , а именно к его повышению с ростом вязкости минерального масла. Это в свою очередь приводит к росту пика давления на контакте и к снижению ресурса подшипников. Повышенная вязкость смазочного материала при

частом срабатывании смазочных питателей от работы централизованных станций в автоматическом режиме ведет к более высоким контактным напряжениям, а это снижает срок службы подшипника. Так повышение контактных напряжений в 1,13 раза в соответствии с зависимостью  $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}$  ведет к снижению долговечности  $L$  подшипника в 1,5 раза.

В связи с этим для снижения параметра скорости необходимо понижать класс вязкости смазочного материала. Но одновременно необходимо обеспечить в подшипнике качения возможность реализации режима эластогидродинамической смазки.

Нагрузку на каждый ролик подшипника и угол зоны нагружения подшипника определяем по следующей формуле [3]:

$$Q_{\psi_i} = Q_{\max_i} \left[ 1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \psi_i) \right]^n, \quad (2)$$

где  $Q_{\psi_i}$  — нагрузка на тело качения ряда  $i$  в положении  $\psi^0$ , кН;  $Q_{\max}$  — нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным телом качения (ролик), кН;  $\varepsilon$  — коэффициент,  $\varepsilon = 0,5$ ;  $\psi_i$  — угол зоны нагружения для  $i$ -го ряда роликов;  $n$  — коэффициент,  $n = 1,5$  — при точечном,  $n = 1,11$  — при линейном контактах.

Угол зоны нагружения для  $i$ -го ряда роликов определяем по формуле

$$\psi_i = \arccos(1 - 2\varepsilon) = \pm 90^\circ. \quad (3)$$

Угол между соседними роликами одного ряда определяем по формуле

$$\Delta\psi = \frac{360^\circ}{z}, \quad (4)$$

где  $z$  — число тел качения в одном ряду подшипника.

Нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным телом качения, для всех рядов подшипника будет одинакова и определяется по формуле [3]

$$Q_{\max} = \frac{P}{z J_p \cos \alpha}, \quad (5)$$

где  $P$  — нагрузка, действующая на подшипник ролика роликовой секции,  $P = 30$  кН;  $J_p$  — числовой коэффициент, для двухрядных подшипников качения  $J_p = 0,4577$ ;  $\alpha$  — угол контакта ролика с дорожкой качения,  $\alpha = 12^\circ$ .

По формуле (5) рассчитана нагрузка, действующая на каждый ролик зоны нагружения. Получен следующий результат:

$\pm \psi_{is}$ .....	$Q_{\psi_i}$ , кН
7,5 .....	9,18
15 .....	8,75
22,5 .....	8,21
30 .....	7,50
37,5 .....	6,57
45 .....	5,53
52,5 .....	4,41
60 .....	3,29
67,5 .....	2,20
75 .....	1,22
82,5 .....	0,44
90 .....	0,00

Толщина масляной пленки определяется из зависимости

$$h_0 = 3,17(\eta_0 U_{\Sigma})^{0,75} \alpha^{0,6} \rho_{пр}^{0,4} q_H^{-0,15}, \quad (6)$$

где  $h_0$  — толщина смазочного слоя в точке, в которой градиент давления равен нулю, м;  $\eta_0$  — динамическая вязкость масла при атмосферном давлении и рабочей температуре, Па·с;  $U_{\Sigma}$  — суммарная скорость качения на контакте, м/с;  $\alpha$  — пьезокоэффициент вязкости смазочного материала, МПа<sup>-1</sup>;  $\alpha = 0,02$  МПа<sup>-1</sup>;  $\rho_{пр}$  — приведенный радиус кривизны поверхностей трения, м;  $q_H$  — нагрузка на единицу длины линии контакта, Н/м;

$$U_{\Sigma} = \frac{\pi D_0 n_i}{60} (1 - \gamma^2), \quad (7)$$

где  $D_0$  — средний диаметр подшипника, м;  $n_i$  — частота вращения внутреннего кольца подшипника рабочего вала, об/мин;  $n_7 = 1$  об/мин;  $\gamma$  — приведенный коэффициент радиуса кривизны;

$$\gamma = \frac{D_W}{D_0} \cos \alpha; \quad (8)$$

$D_W$  — диаметр ролика, м.

Смазочный материал — Униол 2М; класс вязкости базового масла — 220.

Необходимую вязкость при температурах  $T_0 = 40$  °С,  $T_0 = 60$  °С,  $T_0 = 90$  °С определяем, по зависимости

$$\eta_0 = \eta_3 \left( \frac{T_3}{T_0 k} \right)^n \quad (9)$$

где  $\eta_3$  — эталонная динамическая вязкость масла при атмосферном давлении;  $n$  — коэффи-

циент, зависящий от вязкости смазочного материала,  $n = 2,92$ ;  $T_0$  — объемная температура подшипникового узла, °С;  $T_3$  — температура, при эталонной вязкости масла, °С;  $k$  — температурный коэффициент,  $k = 1,1-1,8$ .

Анализ расчетных значений динамической вязкости при атмосферном давлении и рабочей температуре показывает, что толщина масляной пленки в подшипниках качения в зоне контакта наиболее нагруженного ролика для различных температур  $T_0 = 40, 60$  и  $80$  °С — составляет соответственно 1,15; 0,8; 0,4 мкм.

В процессе эксплуатации в подшипниковые узлы проникают вода, механические примеси (окалина) и высокие температуры, в результате чего пластичный смазочный материал меняет свойства [4].

При эксплуатации машин непрерывного литья заготовок вода является неотъемлемой частью, так как необходимо проводить постоянное охлаждение слябов и роликов в роликовых секциях.

Были обследованы 50 блоков, в которых произошло заклинивание роликов. Результаты мониторинга данных роликов показали, что водяные каналы засорены, соответственно проток воды через корпус средней опоры затруднен и смазочный материал отсутствует в 20-ти % случаев из-за засоренности смазочных магистралей или их разрушений; в более чем 50 % обнаружено значительное обводнение и загрязнение пластичного смазочного материала.

Для того чтобы проанализировать причины попадания воды, пыли, механических частиц, необходимо проследить путь смазывания (подачи смазочного материала) в подшипниковые узлы опор роликовых секций.

От централизованных станций, которые установлены в отдельных маслопомещениях для каждой МНЛЗ, пластичный смазочный материал поступает к блокам питателей. Периодичность включения станции — 30 мин.

После прохождения блока питателей смазочный материал поступает в подшипниковые узлы роликовых секций, где и происходит основной процесс охлаждения водой.

Эксплуатация централизованных станций осуществляется на пластичном смазочном материале Униол-2М, изготовленном по техническим условиям ТУ 38.5901243–92 и предназначенном для применения в узлах трения металлургиче-

ского оборудования с системами централизованного смазывания. Основные эксплуатационные характеристики этого пластичного смазочного материала — высокая термостойкость, хорошие противозадирные характеристики, прокачиваемость и работоспособность при температуре от  $-30$  до  $+160$  °С

С использованием тепловизора «THERMO-KAM P60» были произведены замеры температур на смазочных магистралях от блоков питателей до подшипниковых узлов роликовых секций.

Результаты исследования показали, что температура свыше  $150$  °С наблюдается на роликах и подшипниковых узлах первых шести секций. В свою очередь температура свыше  $150$  °С оказывает негативное влияние на работу всего оборудования МНЛЗ, разрушая уплотнительные узлы подшипниковых опор и способствуя интенсивному старению пластичного смазочного материала, как уплотнительного (там, где используются закрытые подшипники качения), так и непосредственно эксплуатационного Униола 2М. В таблице представлены реологические и физико-химические свойства пластичного смазочного материала Униол 2М

Из таблицы видно, что наиболее подходящий материал для смазывания роликовых секций от централизованной станции — Униол 2М/2, так как известно, что при повышении температуры динамическая вязкость пластичного смазочного материала повышается, а не понижается, как у жидких смазочных материалов.

Однако высокие внешние температуры отрицательно влияют как на Униол 2М/1, так и на Униол 2М/2. Они, приводя к закоксованию смазочных трубопроводов, затрудняют прокачиваемость и снижают стойкость подшипников качения, так как в зоне контакта вязкость базового масла резко снижается, и, как следствие, снижается толщина масляной пленки, а под-

шипники качения работают в режиме сухого трения.

Таким образом, закоксованный смазочный материал способствует разрушению трубопроводов и подшипниковых узлов изнутри, а вода и высокие температуры способствуют их разрушению снаружи, и все это приводит к попаданию в подшипниковые узлы воды, пыли и механических примесей, снижая тем самым реологические и физико-химические свойства пластичных смазочных материалов.

Проверка адекватности полученных результатов осуществлялась на специально разработанной лабораторной установке для моделирования процессов, протекающих в подшипниках качения, а также в условиях кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» на подшипниковых узлах роликовых секций МНЛЗ.

По результатам проведенных теоретических исследований разработаны режимы смазывания подшипниковых узлов роликовых секций МНЛЗ при использовании системы смазывания типа «масло — воздух». По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложено: осуществлять эксплуатацию системы «масло — воздух» на смазочном материале классом вязкости не ниже 460;

при использовании смазочного материала класса вязкости 460 увеличить период его нагнетания в смесительный модуль до 30 сек;

при использовании смазочного материала класса вязкости 680 увеличить период его нагнетания в смесительный модуль до 45 сек;

поддерживать давление воздуха в системе в диапазоне  $0,2-0,4$  атм.

Использование предложенных режимов позволяет снизить износ подшипников и повысить стойкость подшипниковых опор в целом.

Анализ полученных данных показал, что использование пластичного смазочного материала

**Реологические и физико-химические свойства пластичного смазочного материала Униол 2М**

Наименование	Температура каплепадения, °С	Пенетрация при 25 °С, $\times 10^{-1}$ мм	Предел прочности при 20 °С, Па	Вязкость при 0 °С и $10\text{с}^{-1}$ , Па·с, (не более)	Коллоидная стабильность, % (не более)	Работоспособность, °С
Униол-2М/1	$\geq 200$	280–360	250–450	800	7	$(-40)-(+160)$
Униол-2М/2	$\geq 205$	330–380	$\geq 410$	110	12	$(-30)-(+160)$

в подшипниковых узлах МНЛЗ приводит к частому заклиниванию роликов из-за закоксовывания смазки. Наиболее перспективным техническим

решением для устранения вышеперечисленных недостатков является, на наш взгляд [5], внедрение систем смазывания типа «масло — воздух».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.
2. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. М.: Машиностроение, 1983. 543 с.
3. Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.
4. Мироненков Е.И., Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А. Исследование изменения свойств смазочного мате-

риала в подшипниковых узлах рабочих валков чистой группы клетей стана 2000 горячей прокатки ОАО «ММК» // Материалы 64-й научно-технической конференции : сб. докл. / Магн. гос. техн. ун-т. Магнитогорск, 2005. С. 277–279.

5. Мироненков Е.И., Жиркин Ю.В., Дудоров Е.А., Резванов С.Б. Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. № 1. С 58–60.

#### REFERENCES

1. Beyzelman R.D., Tsyppkin B.V., Perel L.Y. Podshipniki kattheniya. Spravochnik. Izd. 6-e, pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 572 s. (rus.)
2. Perel L.Ya. [Bearings: Calculation, design and maintenancetion supports]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 543 s. (rus.)
3. Perel L.Y., Filatov A.A. [Bearings: Calculation, design and service support]. Moscow: Mashinostroenie enie, 1992. 608 s. (rus.)
4. Mironenkov E.I., Zhirkin Ju.V., Dudorov E.A. Issledovanie izmenenija svojstv smazochnoho materiala v pod-

shipnikovyh uzлах rabochih valkov chistovoj gruppy kletej stana 2000 gorjachej prokatki ОАО «ММК». *Materialy 64-j nauchno-tehnicheskoy konferencii: sb. dokl.* / Magn. gos. tehn. un-t. — Magnitogorsk, 2005. S. 277–279. (rus.)

5. Mironenko E., Zhirkin Y., Dudorov E., Rezvanov S. Vliyanie vyazkosti mineralnikh masel na temperaturniy regim podchipnikovyx uzlov rabotchikh valkov prokatnykh stanjv. [The effect of viscosity of mineral oils in the temperature regime of bearing units of work rolls of rolling mills]. *Vestnik MGTU imeni G. Nosov.* 2006. № 1. S. 58–59. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ТЕРЕНТЬЕВ Дмитрий Вячеславович** — кандидат технических наук доцент кафедры машин и технологий обработки давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; e-mail:ktnterentyev@mail.ru

**ПЛАТОВ Сергей Иосифович** — доктор технических наук заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**ЖИРКИН Юрий Васильевич** — кандидат технических наук профессор кафедры механического оборудования металлургических заводов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**МИРОНЕНКОВ Евгений Иванович** — кандидат технических наук доцент кафедры механического оборудования металлургических заводов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

#### AUTHORS

**TERENT'EV Dmitrii V.** — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

**PLATOV Sergey I.** — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

**ZHIRKIN Yuriy V.** — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia

**MIRONENKOV Evgeniy I.** — Magnitogorsk State Technical University named by Nosov G.I., Russia