

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР

Корогодин А.С., Иванов С.Л.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: Арктика, месторождение «Павловское», плавучий горно-обогатительный комплекс, диагностика и мониторинг, изнашивание цапф, барабанные мельницы, рабочая температура подшипников скольжения, испытательный стенд.

Аннотация. В статье рассмотрено серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение «Павловское» на Новой Земле в качестве перспективного проекта для освоения при помощи плавучего горно-обогатительного комплекса. Описана структура предприятия по добыче руд месторождения «Павловское», геотехнология добычи рудного сырья и его переработки плавучим комплексом горного оборудования. В технологической цепи горных машин выделено горное оборудование дезинтеграции, указаны его ресурсопределяющие элементы, в качестве которых выступают опорные подшипниковые узлы скольжения, интенсивность деградиционных процессов которых сказывается на работоспособности барабанных мельниц и всей цепочки последовательно подключенного горного оборудования в целом. Представлены результаты экспериментально полученных зависимостей изменения температуры подшипниковых узлов и ее изменение в зависимости от неточностей рабочих поверхностей цапф и их износа. Показано, что диагностика технического состояния подшипников скольжения по величине его установившейся температуры под нагрузкой и интенсивности ее изменения являются весьма информативным критерием оценки технического состояния последних, а также прогноза оценки остаточного ресурса.

PREDICTION OF REMAINING LIFE OF SUPPORT BEARING UNITS OF DRUM MILL FOR EVALUATION OF SERVICE LIFE BASED ON CHANGE OF TEMPERATURE FIELD

Korogodin A.S., Ivanov S.L.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: Arctic, «Pavlovskoye» field, floating mining and processing complex, diagnostics and monitoring, trunnion wear, drum mills, sliding bearing operating temperature, test bench

Abstract. The article considers the silver-containing lead-zinc deposit "Pavlovskoye" on Novaya Zemlya as a promising project for development by means of a floating mining and processing complex. The structure of the "Pavlovskoye" deposit ore mining enterprise, the geotechnology of ore raw material extraction and its processing by a floating complex of mining equipment is described. In the technological chain of mining machines the disintegrating mining equipment is singled out, its resource-determining elements, such as slide bearing units, the intensity of degradation processes which affects the working capacity of drum mills and the whole chain of mining equipment connected in series, are specified. The results of experimentally obtained dependences of the temperature change of bearing units and its change depending on the inaccuracy of working surfaces of trunnions and their wear are presented. It is shown that the diagnosis of the technical condition of sliding bearings by the value of its steady temperature under load and the intensity of its change is a very informative criterion for assessing the technical condition of the latter, as well as a forecast of the residual resource assessment.

Введение

Актуальным при добыче полезных ископаемых в сложно доступных регионах, подобных Арктике, в последнее десятилетие становится разработка и применение инновационных геотехнологий включающих в свою основу освоение и последующую добычу минеральных ресурсов посредством применения специализированных плавучих предприятий [1] или комплексов [2]. Подобным проектом добычи рудного сырья выступает плавучий горно-обогатительный комплекс при освоении серебросодержащего свинцово-цинкового месторождения «Павловское», расположенного на архипелаге Новая Земля [1].

Данный подход включает в своей основе отказ от классических стационарных методов и технологий освоения и подразумевает под собой необходимость оснащения карьера только лишь минимальным оборудованием для проведения вскрышных работ и для транспортирования полученного рудного сырья крупностью 600-800 мм на плавучий комплекс для последующего обогащения, располагающийся в непосредственной близости от месторождения в специально оснащённом портовом узле.

Таким образом, основные силы оснащения, включающие в себя оборудование дезинтеграции и первичного обогащения размещено на многопалубном плавучем горно-обогатительном комплексе, в состав которого входят бункеры исходной руды, шаровые мельницы, грохоты, двуспиральные классификаторы, механические флотационные машины, сгустители, дисковый вакуум-фильтры, ленточные конвейеры и питатели.

Горно-обогатительное оборудование стационарно устанавливается в отсеках плавучего комплекса горного оборудования и работает в единой технологической цепи добычи и обогащения вместе с оборудованием, расположенном на карьере [1].

На месте непосредственной эксплуатации оборудования не предусмотрено специализированных ремонтных баз, поэтому наряду с ограниченностью свободного пространства на месте установки оборудования и отсутствия невозможности его транспортировать через технологические палубы плавучего комплекса к уровню готовности оборудования предъявляются особые, довольно жесткие требования, к которым относятся мониторинг технического состояния оборудования в целом, экспресс диагностика состояния остальных его элементов, а также возможность восстановления узлов и элементов оборудования непосредственно на месте его стояния, дублирование, резерв и т.д.

В первую очередь для поддержания готовности оборудования на заданном уровне необходимо своевременно осуществлять технологическое обслуживание и ремонт в уникальных условиях стесненности окружающего пространства, низкой маневренности материалов, ресурсов, специальных приспособлений для осуществления ремонтных воздействий и невозможности перемещения технологического оборудования с места установки [3]. Все это требует создания специальных устройств и оснастки для обеспечения профилактических ремонтных работ и сервисного обслуживания встраиваемых в рабочий фундамент стояния эксплуатируемого горного и обогатительного оборудования или его опорных узлов в течение всего срока его службы [4] с учётом технических, технологических и организационных факторов и связей между ними в рамках теротехнологии для проведения предупредительного технологического обслуживания и ремонта, основываясь прежде всего на осуществлении четкой обратной связи посредством мониторинга и контроля параметров работоспособности узлов оборудования в заданных пределах для минимизации, как временных, так и ресурсозатратных процедур по осуществлению ремонтных и профилактических работ [5].

Отказы в ресурсопределяющих узлах барабанных мельниц

Дорогостоящие объекты длительного срока эксплуатации, характеризующиеся повышенной сложностью, к которым относится плавучий горно-обогатительный комплекс, в частности его технологическое оснащение в виде набора последовательно соединенного горно-обогатительного оборудования, требуют постоянного технического обслуживания и ремонта на протяжении всего периода рабочего цикла для сохранения производительности при высоком уровне готовности и минимизации рисков отказов системы элементами которой они являются.

Процесс получения концентрата из обогащаемого рудного сырья карьера сопровождается непрерывной работой ряда последовательно соединенного горного оборудования в единую технологическую цепь, расположенного на многопалубном плавучем горно-обогатительном комплексе, отвечающего за дробление, грохочение, измельчение, классификацию, флотационное обогащение, обезвоживание, сушку концентрата и т.д. Следовательно, при возникновении отказа в каком-либо взаимосвязанном оборудовании

возникает нарушение работы всего технологического процесса обогащения, что приводит к потерям в сырье и характеризуется дополнительными трудо и ресурсозатратами [3].

Поэтому для безотказной и эффективной эксплуатации горного оборудования плавучего комплекса необходимо своевременное проведение профилактических работ и предупреждающего технического обслуживания, заключающегося в поддержании функционирования ресурсопределяющих узлов и механизмов в заданных значениях, для чего производится восстановление их рабочих поверхностей. Наиболее уязвимым в этом отношении оборудованием плавучего горно-обогажительного комплекса является крупное динамическое оборудование дезинтеграции, испытывающее неравномерные осевые и радиальные нагрузки, в частности это касается барабанных мельницы различных стадий дробления и измельчения, основной из причин потери работоспособности которых является выход из строя их опорных подшипниковых узлов скольжения [6].

Частым явлением, сопровождаемым работу опорных подшипниковых узлов барабанных мельниц, является засорение системы смазки и неисправность уплотнительных средств ввиду долгосрочной работы мельницы, приводящие тем самым к перегреву узлов скольжения. Опорные устройства барабана мельниц выполняются в виде подшипников скольжения с вкладышами, взаимодействующих с пустотелыми цапфами корпуса барабана. Между ними создается масляная подушка, при этом любая неточность взаимного расположения рабочих поверхностей подшипников и цапф ведет к нарушению терморегуляции подшипникового узла в целом [7]. Вследствие возникающих тепловых процессов вкупе с вибрацией и высокими удельными нагрузками, усугубляемыми человеческим фактором [8], происходит неравномерное изнашивание рабочих поверхностей цапф подшипниковых узлов и баббитовых вкладышей. Нарушение профиля продольного сечения, круглости и соосности загрузочной цапфы относительно рагрузочной приводит также к сильным местным перегревам с оплавлением поверхностного слоя баббитовых вкладышей, его схватыванием и налипанием на поверхности пустотелых цапф, тем самым приводя к повреждению образовавшимся абразивными частицами шлифованных рабочих поверхностей цапф корпуса с образованием на них глубоких кольцевых рисок, забоин, наряду с влиянием ударных нагрузок в барабане корпуса мельницы происходит и возникновение микроям на шлифованных рабочих поверхностях цапф в целом.

Процесс повреждения, хотя и медленный, в долгосрочной перспективе вызывает ухудшение параметра шероховатости материала цапф и способствует усталостному разрушению [6]. В свою очередь риск отказа подшипникового узла при таком исходе напрямую возрастает с увеличением скорости и нагрузки в замкнутой кинематической системе работы оборудования.

Таким образом, опорные подшипниковые узлы являются важными ресурсообразующими частями работы барабанных мельниц, и как следствие всей технологической линии обогащения плавучего горно-обогажительного комплекса.

Мониторинг и контроль неисправности подшипниковых узлов

Важным элементом надежно-центрированного подхода в поддержании оборудования плавучего комплекса в работоспособном состоянии является мониторинг его технического состояния. Автоматический контроль неисправности опорных подшипников скольжения и их изнашивания с контролем динамической нестабильности кинематической замкнутой системы в режиме реального времени при различных условиях работы и нагрузки на систему является необходимым показателем интеллектуальной производственной системы [9].

Нет сомнений в том, что своевременная информация о параметрах работоспособности, характеризующих стабильность состояния работы узлов, была бы полезна для обеспечения раннего предупреждения о неисправностях и предотвращения ненужных дорогостоящих ремонтных работ, когда можно было бы обойтись лишь предупреждающим техническим обслуживанием.

Поэтому при эксплуатации динамического оборудования с ресурсопределяющими узлами вращения, в роли которых выступают опорные подшипники скольжения, необходимо проведения мониторинга, в ходе которого осуществляются измерения и фиксирования ряда параметров с помощью автоматической системы управления [10]. К контролируемым параметрам в режиме реального времени относятся: измерение температуры масла в подшипниках скольжения, температуры масла на входе и на сливе, замер уровня масла в поддоне, контроль температуры охлаждающей воды на входе в охладитель масла, замеры уровней виброакустических характеристик для электропривода и узлов вращения, контроль величины вольт-амперных характеристик электродвигателя, частота вращения электродвигателя и выходного звена, образующийся момент силы нагружения в замкнутой системе, контроль перепада давления на маслофильтре управления, давление масла в системе управления, в системе смазки, давление и температура картерных газов в корпусе. Также во время остановки между циклами работы осуществляется проверка невозвратных потерь масла в системе, проверка температуры наружных поверхностей, наличие абразивных частиц, металлической пыли и прочих загрязнений осевших на сетках маслофильтров, проверка функционирования всех механизмов и систем при управлении от локальной системы управления.

Зависимость температурного режима работы подшипниковых узлов скольжения от отклонения профиля цапф

В ходе проведения промышленных испытаний передаточных узлов с опорными подшипниками скольжения на специально оборудованном стенде, была оценена работоспособность подшипниковых узлов скольжения, характеризующаяся тепловым полем изменения температур от геометрических параметров профиля цапф. Испытания подшипниковых узлов скольжения проводилось для каждого передаточного узла по принципу механически замкнутого контура (Пат. 2509999 [11]) с поэтапно задаваемой мощности в системе от привода стендового электродвигателя и гидравлического нагружателя (рис. 1). Регистрация показаний параметров работоспособности и создаваемой мощности в системе производилась автоматической системой управления в режиме реального времени с автоматизированного рабочего места.

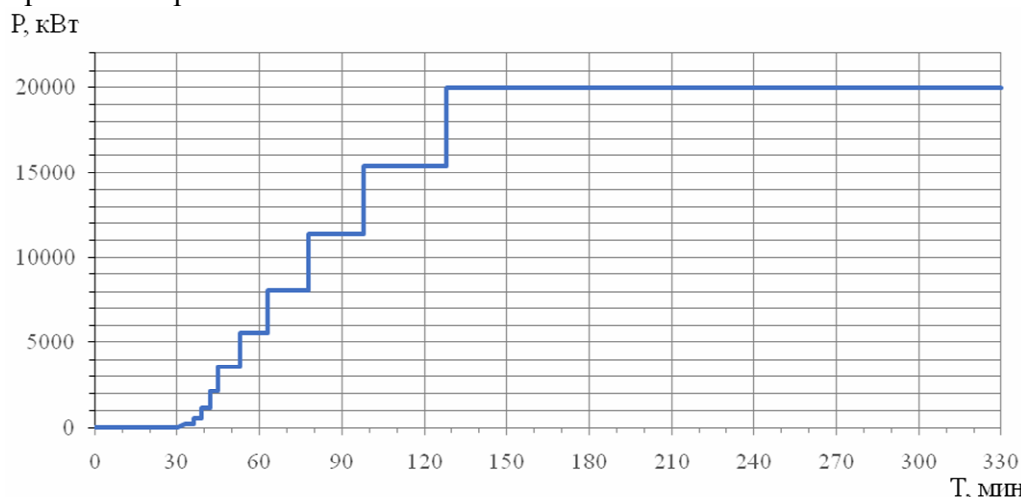


Рис. 1. График выхода на режим при испытании подшипниковых узлов скольжения

Габаритные размеры испытуемых пустотелых цапф составляют: 300 мм в диаметре и 228 мм в длину. Материал цапф, расположенных на одном валу, сталь конструкционная легированная 15Х2ГН2ТРА, материал вкладышей подшипников – скольжения баббит Б83, для создания масляной пленки в узле скольжения использовалось минеральное масло Тп-46 ГОСТ 9972 - 2020.

На рисунке 2 представлен график изменения температур в подшипнике скольжения с цапфой, геометрический профиль которой находится в пределах, заданных конструкторской

документацией, а именно: поле допуска на диаметр цапф 0,032 мм, отклонение от круглости не более 0,005 мм, по профилю продольного сечения – не более 0,005 мм, биение одной цапфы относительно другой не более 0,015 мм (см. табл. 1). Примем цапфу с номинальными значениями геометрических параметров за базовую, обозначив ее Ц_{1.ном}. Здесь и далее, испытание подшипниковых узлов проводились согласно графику нагружения на рисунке 1.

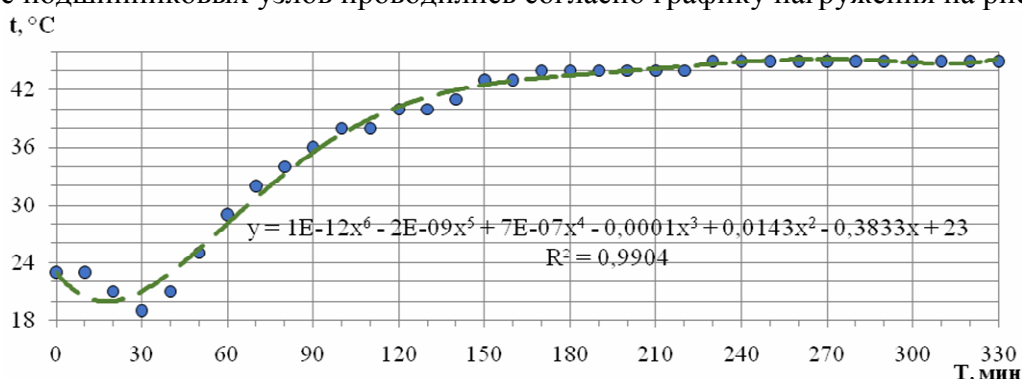


Рис. 2. Изменение температуры подшипника скольжения с цапфой Ц_{1.ном}

Табл. 1. Геометрические параметры испытываемых цапф

Геометрический параметр цапфы, мм	Отклонение от профиля цапфы для каждой группы, мм							
	Номинальная, Ц _{1.ном}		Минимальная, Ц _{2.мин}		Повышенная, Ц _{3.пов}		Аварийная, Ц _{4.авр}	
	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс
Ø 300 ^{-0,343} _{-0,375}	299,653	299,655	299,746	299,752	299,713	299,735	299,706	299,775
○0,005○	0,004	0,005	0,016	0,017	0,022	0,024	0,036	0,077
□0,005	0,003	0,003	0,022	0,028	0,036	0,040	0,043	0,069
↗ 0,015	0,011		0,027		0,083		0,191	

На рисунке 3 представлен график изменения температур в подшипнике скольжения с цапфой, геометрический профиль которой не соответствует заданным параметрам и характеризуется равномерными не скачкообразными отклонениями, профиль и допуск расположения поверхностей в данном случае превышает предельно допустимую норму примерно в 3-5 раз (см. табл. 1). Обозначим данную цапфу как минимальную – Ц_{2.мин}.

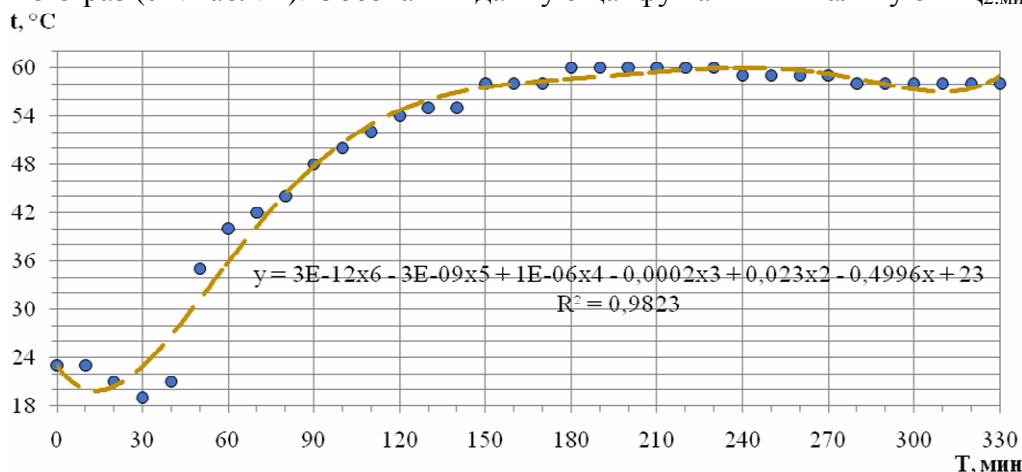


Рис. 3. Изменение температуры подшипника скольжения с цапфой Ц_{2.мин}

На рисунке 4 представлен график изменения температур в подшипнике скольжения с цапфой, геометрический профиль которой превышает заданные конструкторской документацией параметры. Обозначим цапфу как повышенную по отклонениям – Ц_{3.пов}. Отклонения профиля данной цапфы от заданного характеризуется неравномерным распределением по длине и диаметру и превышают предельно допустимые нормы в 5-8 раз

(см. табл. 1). Температурный режим работы при выходе на рабочую нагрузку с данными отклонениями профиля цапфы характеризуется достижением предельного установленного температурного показателя работоспособности испытуемого подшипникового узла скольжения в 85°C со срабатыванием аварийно-предупредительной сигнализации.

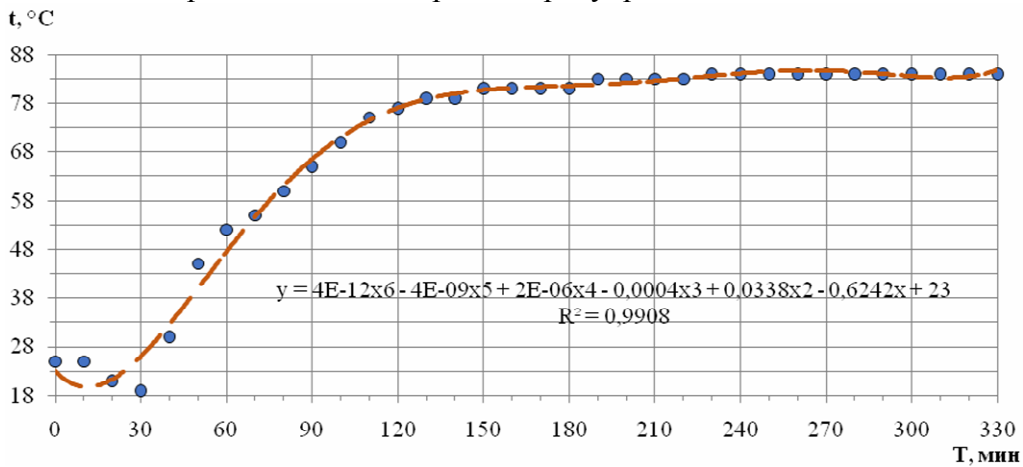


Рис. 4. Изменение температуры подшипника скольжения с цапфой Ц_{3.пов}

На рисунке 5 представлен график изменения температур в подшипнике скольжения с цапфой, геометрический профиль которой превышает заданные параметры в 7-15 раз. Обозначим цапфу с данным профилем как аварийную – Ц_{4.авр}. При отклонении профиля поверхности более чем в 10 раз и неравномерности максимального и минимального значения диаметра по сечениям в диапазоне 0,07 мм возникает аварийный режим работы, при котором происходит разбалансировка передаточного узла вращения, и, как следствие, выкрашивание баббитовых вкладышей подшипника, приводящее к интенсификации процесса изнашивания рабочего профиля цапф, уменьшению масляной пленки, закусывания поверхности цапфы о баббитовый слой, что сопровождается возникновением искр, и, вкпе с масляными парами, приводит к всхлипыванию подшипникового узла.

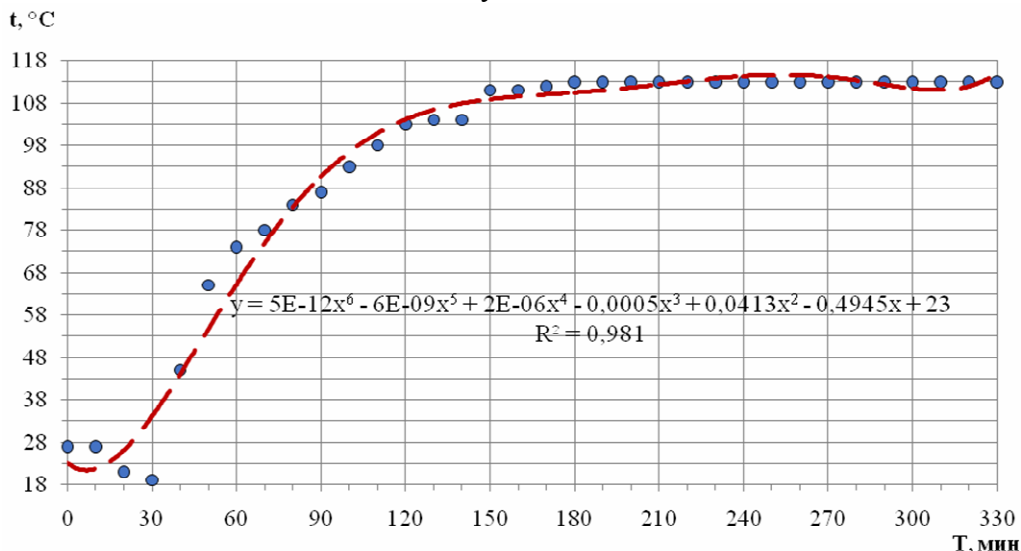


Рис. 5. Изменение температуры подшипника скольжения с цапфой Ц_{4.авр}

В ходе стендовых испытаний было выявлено, что при достижении рабочей температуры в подшипниковом узле более 123°C происходит выкашивание подшипниковых узлов в течение нескольких часов работы (см. рис. 6). Примерное время составляет от 3-х до 6-ти часов (разовый цикл нагрузки). При повышенных температурах, когда начинает происходить выкрашивание баббитового слоя, подшипниковый узел может не выходить из строя и продолжать работать с происходящим в нем интенсивным деградационным процессом. Контроль осуществлялся в процессе демонтажа визуалью.

Представленные выше графики температурных режимов работы подшипниковых узлов скольжения сведены на рисунке 7 для наглядности визуализации интенсивности деградационных процессов, обусловленных изнашиванием.



Рис. 6. Разрушение баббитового слоя вкладышей подшипниковых узлов скольжения в течении четырех часов работы при температуре 123°C

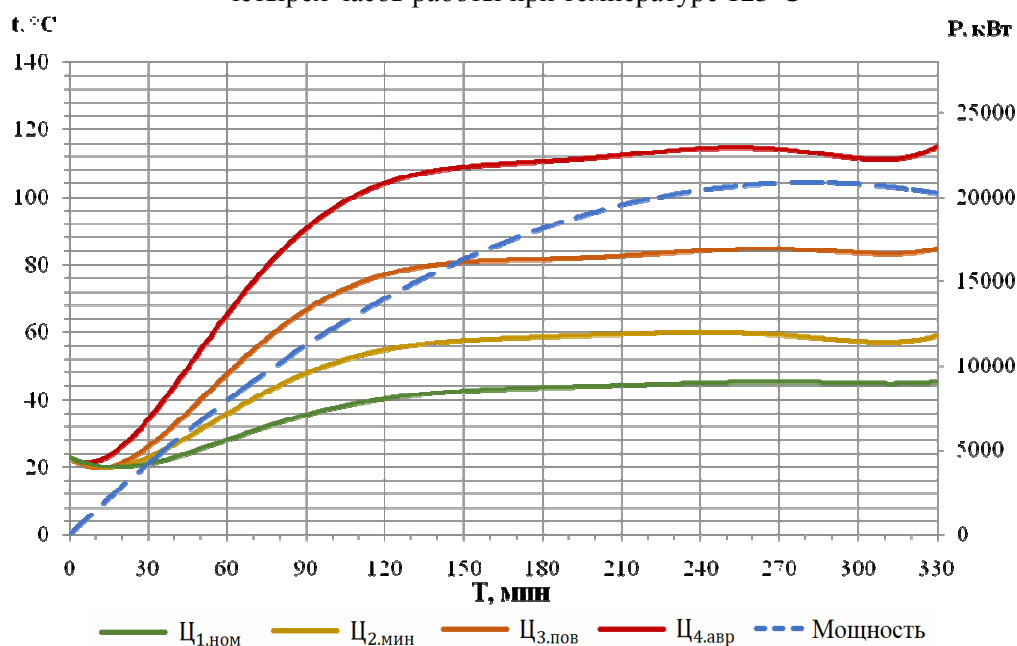


Рис. 7. Рост температуры подшипников скольжения с цапфами Ц_{1.ном}, Ц_{2.мин}, Ц_{3.пов}, Ц_{4.авр} при повышении мощности

Интенсивность изнашивания рабочих поверхностей цапф

В качестве группы цапф для анализа интенсивности изнашивания рабочего профиля выбрана группа с повышенным типом отклонения по геометрии Ц_{3.пов}. Это обусловлено тем, что интенсивность изнашивания у данной группы будет максимальной из всей выборки рассматриваемых профилей цапф (см. табл. 1) при условии возможности работы в тепловом диапазоне температур 80-90°C и отсутствия выкрашивания баббитовых вкладышей. В качестве испытываемых образцов были отобраны 4 подшипниковых узла с отклонениями в геометрии профиля цапф согласно типу Ц_{3.пов} (см. табл. 2). Испытания проводились в течении 62-х часов при циркулируемой мощности в замкнутой системе эквивалентной 1600 до 20000 кВт.

В таблицу 2 внесено по одной из рабочих пар цапф испытываемых четырех передаточных узлов. Из представленных данных видно, что среднее значение диаметра цапф уменьшается в связи с ростом отклонения профиля формы, а именно круглости и профиля

продольного сечения. Профиль цапф изнашивался неравномерно, а в виде усеченного конуса. В свою очередь это повлияло на суммарный показатель отклонения формы и расположения, представленного в виде радиального биения одной цапфы относительно другой. В случае цапфы №1 и №4 базовая шейка, ухудшив свои геометрические параметры круглости и профиля продольного сечения, тем самым повысилась соосность и непараллельность цилиндрических поверхностей. У цапфы №2 и №3 наблюдается противоположный результат. У цапфы №2 наблюдается в целом незначительный износ поверхностей, сказавшийся в основном только на форме продольного сечения. Это связано с тем, что изначальное среднее значение отклонения от круглости превышало допустимое предельное значение. У цапфы №4 в целом наблюдается подобный с цапфой №2 результат изнашивания с той лишь разницей, что в ходе испытания из-за изначального нарушения соосности и параллельности рабочих цилиндрических поверхностей цапф (радиального биения) произошел перекокс фактической оси вращения, который привел к тому, что противоположная базовой цапфа испытывала более интенсивный износ.

Табл. 2. Геометрические параметры цапф до и после 62 часов испытаний для повышенного типа отклонений с профилем Ц_{3.пов}

Геометрический параметр цапфы, мм	Изменение геометрии цапф, мм							
	Цапфа №1		Цапфа №2		Цапфа №3		Цапфа №4	
	До	После	До	После	До	После	До	После
$\varnothing 300_{-0,375}^{-0,343}$	299,738	299,733	299,704	299,698	299,700	299,700	299,756	299,751
$\circ 0,005 \circ$	0,024	0,043	0,011	0,011	0,036	0,052	0,014	0,016
$\square 0,005$	0,036	0,039	0,068	0,075	0,048	0,099	0,102	0,111
$\nearrow 0,015$	0,187	0,148	0,081	0,080	0,083	0,203	0,241	0,191

В данном случае из-за изначальных значительных отклонений профилей цапф сложно судить о интенсивности изнашивания. В целом средняя величина изнашивания за 62 часа работы составила от 0,005 до 0,02 мм на диаметр одной цапфы в зависимости от изначальных отклонений. Износ цапф проявлялся и в виде засорения сеток маслофильтров с номинальной толщиной фильтрации не более 50 мкм (см. рис. 8,а). О износе цапф также можно судить визуально ввиду образования на их рабочих поверхностях множественных кольцевых рисок, точечных вмятин, задиоров, незначительном наслоении баббита и прочее (см. рис. 8,б).

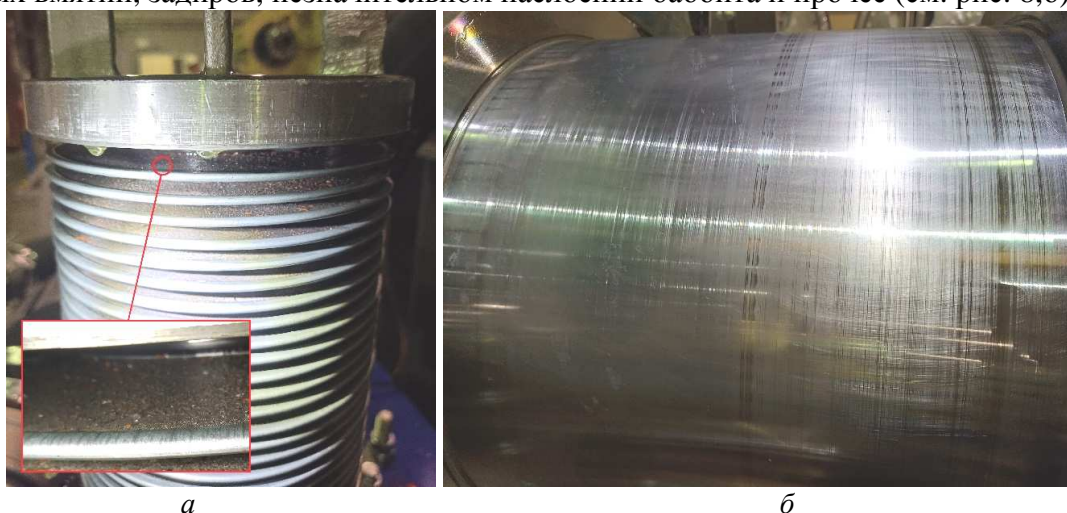


Рис. 8. Проявление процесса изнашивания на цапфах: *а* – засорение сетки маслофильтра металлической пылью; *б* – кольцевые риски, точечные вмятины и задиры на поверхности цапфы

Заключение

На точке стояния плавучего комплекса горного оборудования, специализированных ремонтных объектов полного цикла не предполагается, а проведения полного демонтажа

оборудования согласно классическим методам ремонта и транспортировкой их на ремонтно-промышленные площадки для восстановления опорных подшипниковых узлов скольжения является невозможным. Поэтому для поддержания готовности оборудования на заданном уровне необходимо своевременно осуществлять технологическое обслуживание и ремонт в уникальных условиях стесненного пространства, низкой маневренности материалов и специальных приспособлений для осуществления ремонтных воздействий на основе проведения мониторинга в режиме реального времени. Проведенные промышленные испытания показали, что при отклонении геометрического профиля рабочих поверхностей пустотелых цапф в 7-15 раз от номинала приводит к образованию аварийного режима работы и полному выходу из строя подшипниковых узлов скольжения, что характеризуется резким возрастанием температуры до значений в 123°C, в ходе чего происходит выкрашивание баббитового слоя вкладышей подшипниковых узлов скольжения в течение нескольких часов работы. Также установлено, что при неравномерном отклонении профиля цапфы от заданного в 5-8 раз, температурный режим работы при выходе на рабочую нагрузку характеризуется достижением предельного установленного температурного показателя работоспособности испытуемого подшипникового узла скольжения в 85°C со срабатыванием аварийно-предупредительной сигнализации. При этом данные подшипниковые узлы находятся в рабочем состоянии и могут выполнять свои функции, но в свою очередь это приводит к интенсификации деградиционных процессов и возрастанию изнашивания поверхности по сравнению с номинальными температурными режимами работы.

Таким образом, для восстановления первоначального профиля рабочих поверхностей цапф горного оборудования плавучего комплекса и в частности, нивелирования возрастания деградиционных процессов опорных узлов оборудования дезинтеграции, необходимо своевременно производить техническое обслуживание и ремонт на основе полученных данных мониторинга. Все это требует создания специализированных машин и устройств сборно-разборного блочно-модульного типа для осуществления комплекса ремонтно-восстановительных работ технологического горного оборудования плавучего комплекса без полного демонтажа оборудования непосредственно на месте его технологического стояния в процессе эксплуатации, что имеет существенное значение для развития горной отрасли страны в целом, позволяя эффективно разрабатывать с помощью плавучего горно-обогатительного комплекса не только месторождение «Павловское», но в будущем также и ряд других перспективных минеральных месторождений Арктики [12].

Список литературы

1. Корогодина А.С., Иванов С.Л., Князькина В.И., Газизуллина А.Р. Геотехнология и горно-обогатительный плавучий комплекс для освоения месторождения «Павловское» // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 124-135. – doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-124-135.
2. Юнгмейстер Д.А., Сержан С.Л., Смоленский М.П. Расчет производительности добычного комплекса ЖМК с применением камер разрежения // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 171-176. –doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-171-176.
3. Корогодина А.С., Иванов С.Л., Князькина В.И. Теротехнология динамического горного оборудования дезинтеграции при освоении месторождений в природно-климатических условиях Арктики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – №13. – С. 42-47. – doi.org/10.26160/2658-3305-2021-13-42-47.
4. Корогодина А.С., Иванов С.Л. Восстановление цапф опорных подшипниковых узлов барабанных мельниц // Master's Journal. – 2020. – №2. – С. 49-55.
5. Wang Jianmei, Kang Jianfeng, Zhang Yanjuan, Huang Xunjie. Viscosity monitoring and control on oil-film bearing lubrication with ferrofluids // Tribology International. Elsevier B.V. 2014, vol. 75, pp. 61-68. doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.001.
6. Neves M.D.M., Andrade A.H.P., Silva D.N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants // Engineering Failure Analysis. Elsevier B.V. 2016, vol. 61, pp. 28-36. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
7. Bondarenko J.A., Duyun T.A., Bestuzheva O.V. Investigation of stresses and deformations of ball mill support axles taking into account the temperature field by numerical method // IOP Conference series: materials science and engineering BUILDINTECH BIT 2020. innovations and technologies in construction. 2020, vol. 945, p. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012018.

8. Бессонов А.Е., Шибанов Д.А., Михайлов А.В. Влияние эргатической системы на время рабочего цикла карьерного электрического экскаватора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 136-141. – doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-136-141.
9. Qun Chao, Junhui Zhang, Bing Xu, Qiannan Wang. Multi-position measurement of oil film thickness within the slipper bearing in axial piston pumps // Measurement. Elsevier B.V. 2018, vol. 122, pp. 66-72. doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.016.
10. Zisheng Wang, Jianping Xuan, Tielin Shi. Alternative multi-label imitation learning framework monitoring tool wear and bearing fault under different working conditions // Advanced Engineering Informatics Elsevier B.V. 2022, vol. 54, pp. 17. doi.org/10.1016/j.aei.2022.101749.
11. Патент №2509999 РФ. Стенд для испытания зубчатых передач по схеме замкнутого контура / Иванов С.Л., Звонарёв И.Е., Фокин А.С., Маркова А.Ю., Кремчев Э.А. – Заявка №2012119145/28 от 10.05.2012, опубл. 20.03.2014, Бюл. №8.
12. Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geology Reviews. 2021, vol. 138, p. 104349. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104349.

References

1. Korogodin A.S., Ivanov S.L., Knyazkina V.I., Gazizullina A.R. Geotechnology and mining and processing floating complex for the development of the «Pavlovskoye» deposit // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 124-135. doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-124-135.
2. Jungmeister D.A., Serzhan S.L., Smolensky M.P. Calculation of the productivity of the production complex of the LMK using vacuum chambers // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 171-176. doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-171-176.
3. Korogodin A.S., Ivanov S.L., Knyazkina V.I. Continuous maintenance of dynamic mining equipment for disintegration in the development of fields in the natural and climatic conditions of the Arctic // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2021, no. 13, pp. 42-47. doi.org/10.26160/2658-3305-2021-13-42-47.
4. Korogodin A.S., Ivanov S.L. Restoration of trunnions of support bearing assemblies of drum mills // Master's Journal. 2020, no. 2, pp. 49-55.
5. Wang Jianmei, Kang Jianfeng, Zhang Yanjuan, Huang Xunjie. Viscosity monitoring and control on oil-film bearing lubrication with ferrofluids // Tribology International. Elsevier B.V. 2014, vol. 75, pp. 61-68. doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.001.
6. Neves M.D.M., Andrade A.H.P., Silva D.N. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants // Engineering Failure Analysis. Elsevier B.V. 2016, vol. 61, pp. 28-36. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.
7. Bondarenko J.A., Duyun T.A., Bestuzheva O.V. Investigation of stresses and deformations of ball mill support axles taking into account the temperature field by numerical method // IOP Conference series: materials science and engineering BUILDINTECH BIT 2020. innovations and technologies in construction. 2020, vol. 945, p. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012018.
8. Bessonov A.E., Shibanov D.A., Mikhailov A.V. The influence of the ergatic system on the working cycle time of a quarry electric excavator // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 136-141. doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-136-141.
9. Qun Chao, Junhui Zhang, Bing Xu, Qiannan Wang. Multi-position measurement of oil film thickness within the slipper bearing in axial piston pumps // Measurement. Elsevier B.V. 2018, vol. 122, pp. 66-72. doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.016.
10. Zisheng Wang, Jianping Xuan, Tielin Shi. Alternative multi-label imitation learning framework monitoring tool wear and bearing fault under different working conditions // Advanced Engineering Informatics Elsevier B.V. 2022, vol. 54, pp. 17. doi.org/10.1016/j.aei.2022.101749.
11. Patent No. 2509999 RU. Stand for testing gears according to the closed circuit scheme / Ivanov S.L., Zvonarev I.E., Fokin A.S., Markova A.Yu., Kremcheev E.A. – Appl. No. 2012119145/28 from 10.05.2012, publ. 20.03.2014, Bul. No. 8.
12. Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geology Reviews. 2021, vol. 138, p. 104349. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104349.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Корогодин Артур Сергеевич – аспирант	Korogodin Artur Sergeevich – postgraduate student
Иванов Сергей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения	Ivanov Sergey Leonidovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of mechanical engineering
s215046@stud.spmi.ru	

Получена 30.11.2022