

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## ЧАСТЬ 3. ПРОЦЕССЫ, ВЕДУЩИЕ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

Одной из задач технической диагностики является прогнозирование состояния технической системы. Актуальность решения данной задачи для механического оборудования, в частности, металлургических предприятий, не вызывает сомнений. Возможность предвидения поведения

### В. А. Сидоров

Донецкий национальный  
технический университет  
sidorov\_va@ukr.net

**Физические модели развития отказов** в наибольшей степени позволяют определить причинно-следственные связи, учитывая реальные процессы, ведущие к изменению свойств объекта и его составляющих. Силовое и кинематическое взаимодействие элементов носит сложный характер. Поведение этих объектов существенным образом зависит от их взаимодействия с окружающей средой, от характера и интенсивности процесса эксплуатации. Для предсказания поведения деталей и элементов машин необходимо рассматривать процессы нагружения, деформирования, изнашивания, накопления повреждений и разрушения. Описание физических моделей приведено в работе И.Б. Герцбаха и Х.Б. Кордонского

**Модели допустимых значений** — предполагают, что разрушение происходит при превышении действующего напряжения допустимого значения. К этим моделям относятся расчетные модели сопротивления

материалов, теории упругости, теории пластичности и т.д. Это модели типа «нагрузка — сопротивление», учитывающие вероятностный характер действующих сил и снижение уровня сопротивляемости объекта внезапным отказам вследствие процесса старения материалов.

В эту группу можно отнести и **модель мгновенных повреждений**, используемую для моделирования внезапных отказов при воздействии неконтролируемых внешних сил, превышающих действующие допустимые значения. Внешняя нагрузка для металлургических машин может служить причиной отказа безотносительно к существующему техническому состоянию объекта. Основные методы предупреждения и предотвращения в данном случае связаны с ограничением действующих сил: токовая или механическая защита. Часто используется установка «слабого звена» — разрушающегося элемента в виде срезных пальцев, пластиковых вставок и др.

**Модели износных повреждений** — рассматривают развитие повреждений в результате постепенного накопления изменений в деталях механизма из-за износа. Процесс изнашивания деталей машин при

эксплуатации в общем случае имеет три периода (рис. 1). *Первый этап* — приработка, при которой темп изнашивания повышен в результате истирания начальных неровностей или вследствие перекоса поверхностей сопряженных деталей. *Второй этап* — установившийся износ, когда происходит естественное изменение форм и размеров деталей в процессе работы машины. *Третий* — интенсивный износ, характеризуемый резким нарастанием скорости износа ввиду недопустимых изменений в сопряженных деталях. В этот период происходит отказ узла. Точка перехода от участка нормальной работы к участку интенсивного износа определяет допустимое значение износа детали, при котором необходим ремонт узла.

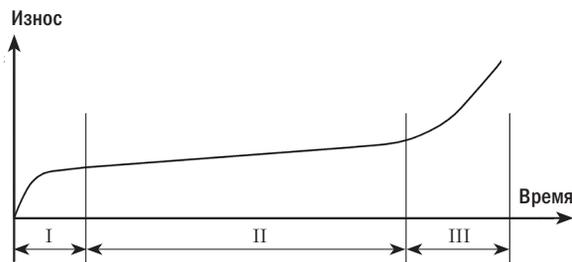
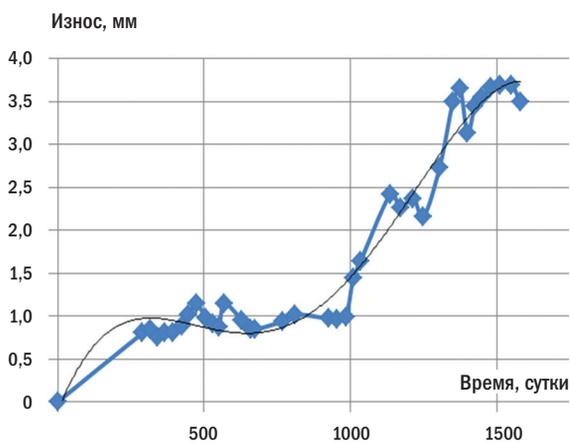


Рис. 1. Типовая кривая износа

В действительности износ деталей протекает при неустановившемся режиме в отношении нагрузок, скоростей, качества смазки, физического состояния поверхности трущихся тел и др., поэтому фактический износ может иметь различную скорость и различные допустимые уровни для однотипных деталей.



**Пример 1.** В процессе эксплуатации состояние опорных колец механизма поворота свода электродуговой печи оценивается по значениям износа на основании результатов измерения от элемента поворотного кольца до неподвижной фиксированной базы. Измерения проводятся ежемесячно при идентичных условиях расположения свода относительно печи.

Полученные результаты указывают на развитие износных повреждений с различными параметрами для однотипных узлов. В первом случае срок службы опорного кольца составил 4,2 года, во втором — 3,1 года (рис. 2). В первом случае скорость износа резко увеличилась после 1,0 мм, а во втором — после 3,0 мм, что объясняется индивидуальным изготовлением и различиями в условиях эксплуатации. Скорость износа в зоне длительной эксплуатации находится в диапазоне 0–0,1 мм/месяц. Скорость износа в зоне ускоренного износа может составлять 0,5–1,5 мм/месяц и зависит от состояния контактирующих поверхностей, действующих сил и качества смазывания.

Значения линейного износа опорного кольца позволяют своевременно обнаружить начало ускоренного износа, принять меры по снижению скорости изнашивания и вовремя подготовиться к замене. Момент начала зоны ускоренного износа остается неизвестным. Наблюдая в течение трех лет медленный рост значений износа, невозможно прогнозировать остаточный ресурс опорного кольца.

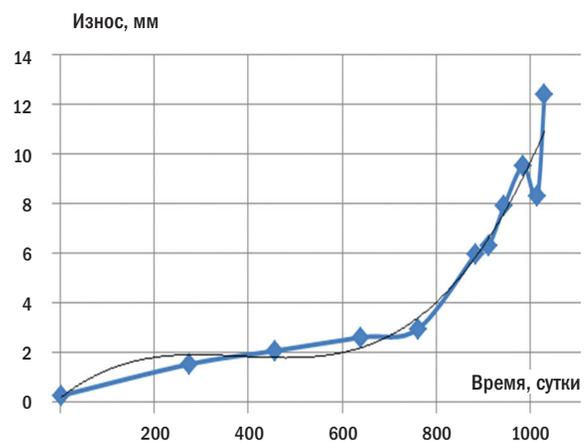


Рис. 2. Реализации износа однотипных опорных колец

Теоретический и практический интерес представляет выяснение характера связи действующих сил, износа со временем работы детали в условиях эксплуатации. К этим моделям относятся **модели накопления повреждений**. В некоторых случаях действующие силы и износ имеют линейную зависимость, часто эта зависимость имеет сложный характер, приводящий к ступенчатому изменению состояния.

**Модели ступенчатых изменений** — учитывают постепенное накопление повреждений со скачкообразным изменением состояния объекта. Так, например, постепенное накопление пластических деформаций приводит к росту усталостных повреждений и может служить причиной внезапного отказа из-за мгновенного изменения свойств или изменения физических процессов взаимодействия деталей.

При математическом описании данных моделей используется марковский процесс. Однако отсутствие статистических данных о вероятности перехода из одного состояния в другое делает невозможным применение данного подхода для определения времени замены детали в конкретных условиях эксплуатации.

**Пример 2.** Считается, что если известна скорость развития конкретной неисправности объекта, характеризующая скоростью изменения значения диагностического параметра, то возможна постановка прогноза.

Практически применение этого положения приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Оценка технического состояния винтового компрессора SAB-163NF проводилась по результатам вибромониторинга параметров общего уровня вибрации и периодически проводимого спектрального анализа вибрации (рис. 3). В течение 4 лет работы не было зарегистрировано значительных отклонений, уровень вибропараметров был стабилен и не превышал 3,6–5,2 мм/с.

В июле 2002 года отмечено резкое увеличение уровня вибрации (рис. 3) — после аварийной остановки компрессора в результате отключения электроэнергии во время грозы в маслосистему компрессора попало значительное количество загрязняющего материала (глицерина) из-за повреждения теплообменной трубки в кожухотрубном испарителе системы промежуточного охлаждения. Вибрация компрессора стала увеличиваться, среднеквадратичные значения виброскорости составили 12,0–16,0 мм/с.

Именно в этот период начался ускоренный износ ведомого ротора, что выразилось в износе подшипников, износе шейки вала, неравномерном износе ротора. Увеличение вибрации по результатам предыдущих измерений предсказать было невозможно.

Таким образом, внешнее воздействие окружающей среды, повреждения сопряженных узлов привели к изменению картины износа.

Общий вид компрессора SAB-163



Виброскорость, мм/с



Рис. 3. Общий вид и тренд вибрации винтового компрессора

**Пример 3.** Вентилятор консольного типа ДН-19 нагревательной печи металлургического агрегата был разрушен в результате катастрофического развития трещины в покрывном диске рабочего колеса. Возникшие неуравновешенные силы привели к деформации элементов рабочего колеса, увеличению нагрузки на рядом расположенный подшипник, заземлению роликов, разрыву сепаратора и нагреву внутреннего кольца до 500–600 °С. При резкой остановке был разрушен корпус механизма. Значения вибрации перед аварией не превышали допустимых значений.

**Пример 4.** При эксплуатации винтового компрессора GRAM-111 общий уровень вибрации не превышал 2,8 мм/с. В результате нарушения технологического режима – попадания в компрессор жидкого аммиака – начался абразивный износ опорного шарикоподшипника, и ведущий ротор сместился на недопустимое значение. Результат – износ корпуса компрессора на 3,0 мм в течение двух недель. Разрушение сопровождалось незначительным изменением характера шума и увеличением параметра огибающей виброускорения в диапазоне от 10 кГц до 30 кГц в пределах допустимых значений. Повреждение было выявлено по утечке смазочного материала через сальник и осевому люфту вала.

Типичной для металлургических машин является ситуация, при которой на их детали действуют одновременно несколько не-

зависимых причин. Наиболее значимые воздействия для металлургических машин: силовое, тепловое, окружающей среды, износное. Среди множества причин, вызывающих отказы, имеются несколько преобладающих. При исследовании объекта преобладающие причины отказов необходимо выявить и установить зависимости взаимного влияния причин повреждений. **Модели действия нескольких независимых причин** используются для исследования усталостных разрушений, возникновения внезапных отказов, моделирования процессов появления внезапных и постепенных отказов.

К данному типу моделей можно отнести **модели взаимного влияния элементов**, наименее изученные в настоящее время. Причиной отказа может быть не только разрушенный элемент, а воздействие на него, оказываемое рядом расположенным элементом. Частой причиной отказов являются дефекты второстепенных деталей оборудования. Исходя из основных положений теории катастроф, процесс отказа следует представить в следующей последовательности – малые отклонения, происходящие в механизме, приводят к увеличению скорости износа отдельных элементов. При достижении определенных значений износа, не всегда достигающих предельного значения, провоцирующее, инициирующее событие (часто не связанное с процессами износа) приводит к отказу – разрушению детали (рис. 4). Существующие методы повышения безотказности и проводимые ремонты

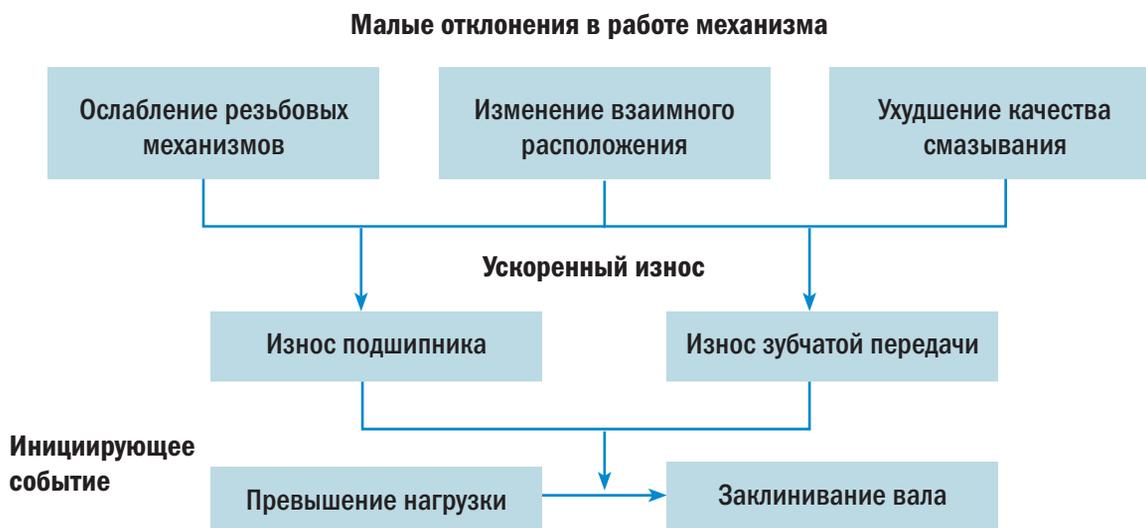


Рис. 4. Процесс развития отказа

в основном ориентируются на уменьшение скорости износа отдельных элементов. Фактически происходит ликвидация последствий, а не причины явления.

Статистические подходы к моделированию базируются на предположении о неизменности условий эксплуатации объекта и неизменности причин возникновения повреждений. При эксплуатации металлургических машин происходит изменение условий эксплуатации (при изменении производственной программы, сезонных влияний окружающей среды) и изменение свойств машины из-за проводимых ремонтов и технического обслуживания. Это ограничивает возможность применения статистических методов при изучении безотказности металлургических машин. Отличием механического оборудования металлургических предприятий во время эксплуатации является возможность развития отказа по любой из известных моделей отказа: мгновенных повреждений, накапливающихся изменений, ступенчатых изменений, действия нескольких независимых причин.

**Пример 5.** Четырехрядный роликовый подшипник обладает большой грузоподъемностью и большой жесткостью. Нагрузка, равномерно распределенная по четырем рядам роликов, делает его практически вечным. Но неравномерный износ посадочных мест, ослабление резьбовых соединений приводят к неравномерному распределению сил и износу одного из колец по одному ряду роликов.

Через длительное время эксплуатации (более 20 лет) замены подшипников рабочих валков чистовых клетей листопрокатного стана стали происходить значительно чаще. Несмотря на обеспечение непрерывности технологического процесса благодаря наличию резерва в виде двух или трех неизношенных беговых дорожек, частые замены подшипника привели к увеличению объема ремонтных работ и дополнительным расходам по закупке запасных подшипников.

Одна из причин сложившейся ситуации — операции по регулировке осевой игры и радиальных зазоров были исключены из практики ремонтных операций.

В первые годы эксплуатации значения зазоров соответствовали работоспособному состоянию подшипника, и про их регулировку просто забыли.

Выяснение причин снижения ресурса подшипников начали с определения характера износа. Вид механического износа — осповидное выкрашивание, которое возникает при напряжениях, превышающих предел усталостной прочности (рис. 5).

Сопрягаемый элемент — подушка подшипника — имеет неравномерный износ посадочной поверхности наружного кольца и зазоры в местах посадки в станину рабочей клетки. Таким образом, постепенные изменения в геометрии посадочных мест корпуса подшипника в сочетании с нарушениями регулировочных операций привели к снижению ресурса подшипника.



Осповидное выкрашивание в ограниченном секторе наружного кольца по одному ряду — местная нагрузка и действие осевой силы



Следы осповидного выкрашивания равномерно распределены по внутреннему кольцу

Рис. 5. Повреждения деталей четырехрядного роликового подшипника рабочего валка чистовой клетки листопрокатного стана

### Развитие аварийных ситуаций.

Практическая ценность результатов прогнозирования для металургических машин заключается в исключении или снижении потерь при развитии аварийных ситуаций. При этом значительную роль играет человеческий фактор, ошибки в техническом обслуживании, изменение производственной программы, режима работы и др. Развитие аварийной ситуации имеет несколько этапов:

- **скрытый**, когда нарушения практически не проявляются или возникают незначительные отказы рядом расположенных узлов;
- **интенсивный**, когда ремонтной службе необходимо принимать меры для продления срока работы оборудования до проведения ремонта;
- **заключительный** — неуправляемый процесс окончательного разрушения.

Одним из признаков скрытого этапа является нарушение предсказуемости в управлении работой механизма. Приведенные далее примеры призваны показать различные варианты развития аварийных ситуаций.

**Пример 6.** Наиболее часто отказы механического оборудования прокатных станов, работающих круглосуточно, происходят в период с 2 до 6 часов. Капитальный ремонт приводного двигателя чистой прокатной клетки «Кварто» листопрокатного стана 2300 был проведен в 2004 году. Мощность двигателя — 4000 кВт, частота вращения — 50–70 об/мин. Для оценки технического состояния под-

шипников скольжения электродвигателя проводился периодический контроль вибрации, прослушивание шумов и постоянный контроль температуры подшипников с использованием стационарной системы контроля. Значения вибрации при работе двигателя не превышали 1,2 мм/с, температура подшипников не превышала 40°C, посторонних шумов, утечек масла, ослабления резьбовых соединений, трещин не отмечено. Длительных остановок в работе двигателя не было.

11 июня 2008 года в 02:10 машинистами дежурной смены была зафиксирована температура подшипников 45°C, о чём была сделана запись в журнале контроля. Спустя 20 минут, в 02:30, сработала сигнализация и произошла аварийная остановка двигателя из-за превышения температуры на свободном подшипнике электродвигателя привода клетки «Кварто» допустимого значения + 65°C. При разборке подшипника обнаружены следы повреждения баббитового слоя вкладыша. В 2:50 на остановленном двигателе зафиксирована температура + 80°C. После пришабривания, через 5 часов простоя, стан был запущен в работу.

19 июня 2008 года после разборки подшипникового узла проведен осмотр вкладыша свободного подшипника электродвигателя клетки «Кварто», при этом обнаружены следующие признаки повреждений (рис. 6):

- следы полусухого трения на поверхности вкладыша;
- увеличение сектора пятна контакта вкладыша, свыше допустимых 60–80°C;
- следы пришабривания 11 июня 2008 года.

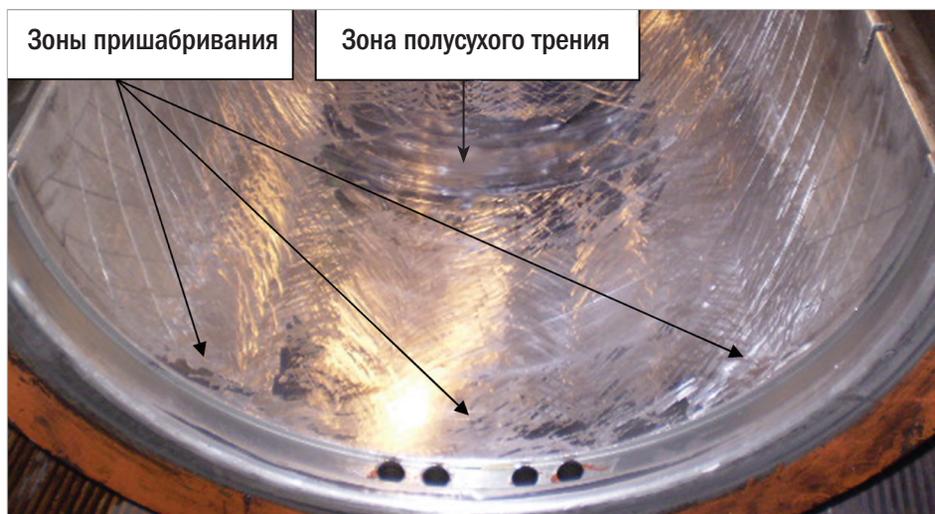


Рис. 6. Повреждения на поверхности вкладыша подшипника скольжения

Возможные причины повреждения.

1. Увеличение сектора пятна контакта вала и вкладыша, свыше допустимых 60–80°C. Это повышает сопротивление для прохождения масла и создает условия для адгезионного схватывания поверхностей вала и вкладыша.
2. Снижение вязкости масла — интенсивная работа оборудования перед отказом, недостаточное охлаждение могли привести к повышению температуры подшипникового узла и снижению несущей способности масляной пленки.

Постепенное накопление отклонений при работе подшипника скольжения привело к мгновенному изменению его технического состояния и повышению температуры. Увеличение сектора пятна контакта повышает сопротивление для прохождения масла, повышает коэффициент трения, приводит к повышению температуры и создает условия для наволакивания баббита на вал.

**Пример 7.** Одним из основных механизмов современной электродуговой печи является механизм перемещения электродов. Этот механизм является исполнительным в системе автоматического регулятора режима горения дуги. Механизм перемещения электродов должен быть надежным в работе и ремонтнопригодным; обеспечивать минимальное трение во всех элементах системы; обладать

быстрым разгоном и торможением; иметь максимально возможную скорость подъема электродов.

Лучше всего данным требованиям удовлетворяют механизмы с гидравлическим приводом, имеющие небольшие габариты и массу; высокое быстродействие; плавность регулирования; высокую скорость перемещения электродов и др. Основные элементы конструкции механизма перемещения электродов с плунжерным приводом показаны на рис. 7. Механизм обеспечивает самостоятельное вертикальное движение каждого электрода с заданной скоростью. Электроды перемещаются вдоль стоек, которые представляют собой пустотелые колонны круглого сечения, внутри которых смонтированы плунжеры.

После начала эксплуатации в 1999 году в работе данного механизма наблюдался стабильный поток событий (2–4 в месяц), связанных с операциями по техническому обслуживанию: уборке технологического мусора, проведению осмотра, затяжке резьбовых соединений, контролю вертикальности стоек и работы системы смазки. Производственная программа оставалась неизменной. В конце 2007 года и начале 2008 года характер выполняемых ремонтных работ изменился. Начали проводиться замены роликов из-за износа подшипников, замены разрушенных резьбовых соединений, ликвидация трещин по сварке и др.

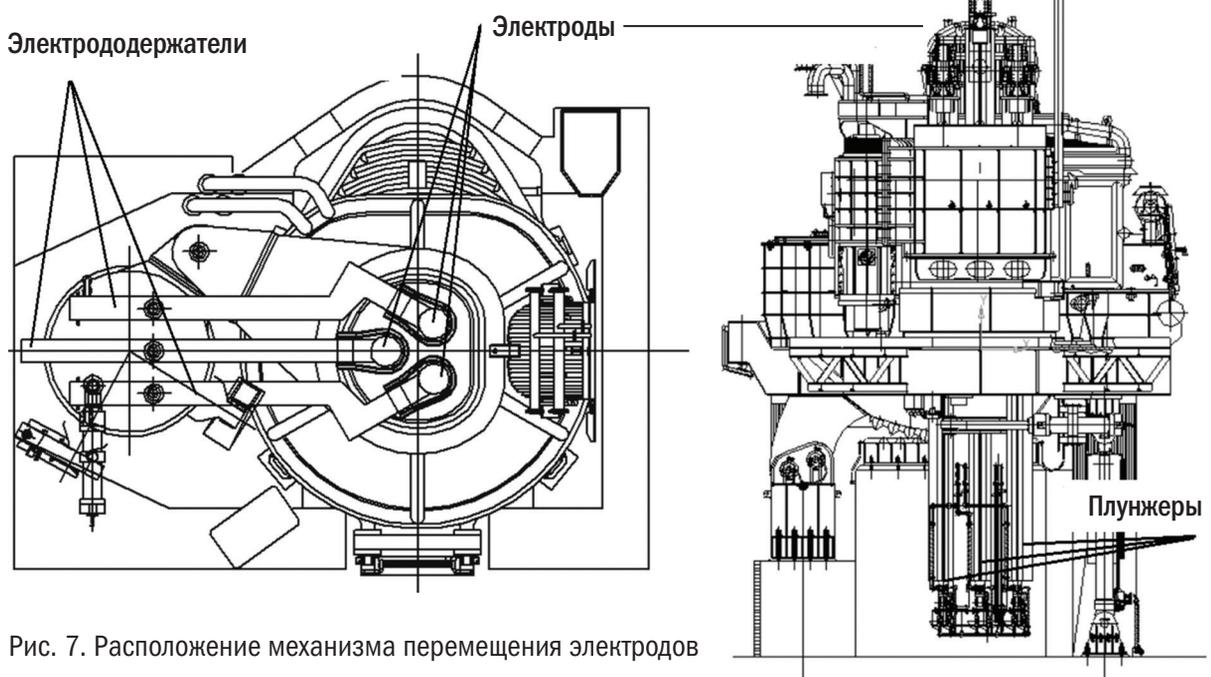


Рис. 7. Расположение механизма перемещения электродов

События, связанные с уборкой технического мусора, заменой смазки и выгоранием защитного уплотнения, составляли стабильный поток, определяемый технологией производства. Появление отказов подшипников, износа роликов, трещин в сварочных соединениях указывало на отклонения в положении направляющих стоек, износе направляющих колонн механизма перемещения.

Во время ремонта 5–8 апреля 2008 года проведены измерения износа направляющих стоек электрододержателей. Установлено, что неравномерный износ направляющих колонн механизма перемещения электродов сосредоточен в нескольких зонах, соответствующих рабочим положениям стоек. Появившийся зазор и приводил к увеличению нагрузки на подшипники роликов в результате воздействия динамических сил из-за зазоров, ослабления резьбовых соединений.

Таким образом, изменение характера ремонтных операция послужило косвенным признаком изменения технического состояния элементов механизма передвижения

электродов. Проведенные измерения износа направляющих стоек позволили установить неравномерность износа и причину возникновения дополнительных динамических сил прямым методом.

**Пример 8.** Разрушение лопасти шпинделя (рис. 8а) черновой клетки «Трио» (рис. 8б) листопрокатного цеха 2300 произошло в 5:30. Данному событию предшествовало увеличение ремонтных работ для устранения мелких неисправностей по элементам уравнивающего устройства в течение предыдущих двух недель. Отклонений в выполняемых функциях, изменений параметров вибрации зафиксировано не было. Работа клетки сопровождается динамическими нагрузками. Превышение допустимых обжатий могло произойти за две недели до момента разрушения. Появление начальной трещины привело к снижению жесткости шпинделя и появлению неисправностей элементов уравнивающего устройства.

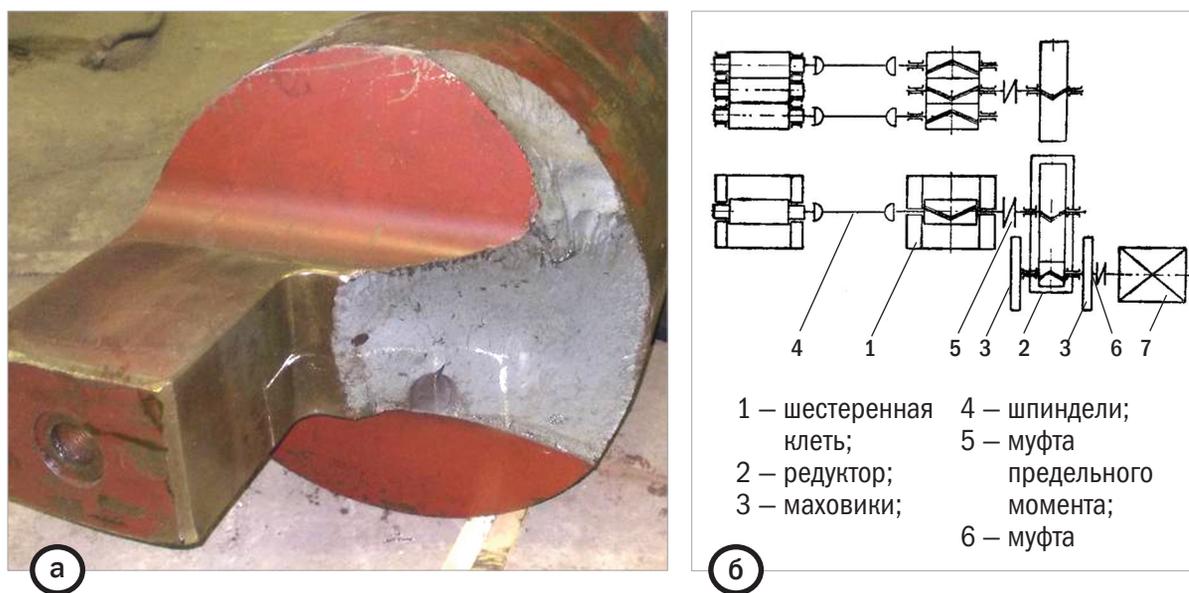


Рис. 8. Общий вид разрушения лопасти шпинделя (а) и кинематическая схема главной линии прокатной клетки «Трио» (б)