СОДЕРЖАНИЕ

Введение…………………………………………………………………………..4

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ,

БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА…………………………………………………….5

1. Понятие безопасности оборудования как показателя его качества

и технического состояния……………………………………………………5

## 1.1 Сущность ресурсной механики……………………………………………..10

1. Модели надежности и безопасности в аспекте контроля

технического состояния……………………………………………………...12

2.1 Методы нахождения вероятности безотказной работы…………………...14

2.2 Концепция допустимого риска и индекс безопасности

при постепенных отказах…………………………………………………….21

2.3 Индекс безопасности при мгновенных отказах…………………………...25

3. Безопасность систем элементов и повреждающих процессов…………….32

3.1 Показатель риска для систем………………………………………………..34

3.2 Индекс безопасности для систем……………………………………………36

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ……………………39

4. Диагностические модели технического состояния оборудования

на основе накопления усталостных повреждений…………………………40

5. Диагностический алгоритм для оценки технического

состояния при усталостном процессе……………………………………….43

5.1 Экспериментальная проверка диагностического алгоритма

при мониторинге процессов наработки и нагружения

элементов конструкций……………………………………………………..53

6. Повышение безопасности на основе деформационных моделей

сопротивления усталости……………………………………………………..60

6.1 Функции распределения долговечностей предохранительного

шпинделя……………………………………………………………………..62

7. Прогнозирование технического состояния кожухов доменных

печей по уровню безопасности…………………………………………....71

7.1 Стойкость и диагностирование кожухов………………………………….72

7.2 Модели для оценки несущей способности кожуха……………………….75

7.3 Определение индекса безопасности по функции распределения

долговечностей………………………………………………………………77

Литература……………………………………………………………………….83

**Введение**

Эффективность от внедрения систем мониторинга работы и диагностирования оборудования связана со стратегией его обслуживания по фактическому техническому состоянию (ТС). В этом аспекте производственников, в первую очередь, привлекает возможность снизить расходы на текущие ремонты (по различным данным на 10 – 30%).

Эффект от стратегии обслуживания по ТС в виде повышения функции готовности и степени выработки ресурса оборудования до его замены (задача изобретательского уровня, так как оба показателя находятся в состоянии технического противоречия) менее осязаем механослужбой металлургического предприятия. Он имеет более глобальный характер и менеджмент предприятия, как правило, не увязывает рост или стабильность производства, а также экономию капиталовложений на обновление оборудования с качеством технического обслуживания и ремонта. Более того, физический износ оборудования стал характерной чертой украинской металлургии, но при этом никто не ставит в заслугу ремонтного хозяйства умение поддерживать работоспособность оборудования в подобных условиях. На производстве стихийно сложилась многоукладность стратегий использования и технического обслуживания оборудования, в зависимости от его значимости по последствиям отказа, что способствует получению прибыли в нынешних условиях.

Чтобы ощутить эффективность от увеличения степени выработки ресурса и коэффициента готовности при поддержании требуемого уровня надежности и безопасности, механикам, прежде всего, следует контролировать эти показатели. Следовательно, необходимо соответственным образом нацелить работу систем наблюдения за работой оборудования, разработав прогнозные диагностические алгоритмы.

Стратегия обслуживания с контролем надежности применяется для промышленных объектов, где имеется парк машин или для однотипных узлов производственной линии. В металлургии имеются такие объекты, но они не оказывают существенного влияния на коэффициент готовности. Более значимы здесь уникальные механические системы, для которых больше подходит стратегия обслуживания с контролем параметров. Однако, сложно найти параметр, который бы комплексно отражал разнообразие повреждающих процессов, воздействующих на оборудование. Стратегия обслуживания с контролем безопасности вобрала в себя достоинства обоих стратегий: индекс безопасности комплексно учитывает действие нескольких деградационных процессов, которым подвергаются элементы механических систем в процессе эксплуатации. Здесь можно рассматривать индекс безопасности как параметр ТС, тогда и области применения этих стратегий совпадают. Однако, стратегия с контролем безопасности направлена преимущественно на прогнозирование срока работоспособного ТС, оставляя, как правило, без внимания исправные и неисправные состояния. Для металлургического оборудования важным является то, что индекс безопасности имеет ресурсную трактовку, что удобно для планирования обслуживания и эксплуатации. Именно связь данного диагностического параметра с ресурсной механикой позволяет ему комплексно учитывать действие системы (композиции) деградационных процессов.

Из 1-й части данного пособия ясно, что методы технического диагностирования нельзя рассматривать в отрыве от эксплуатационных стратегий, к которым относятся стратегия использования оборудования и стратегии его обслуживания и ремонта. При стратегии использования оборудования до отказа в техническом диагностировании, как правило, нет необходимости. При системе планово- предупредительных ремонтов и использовании оборудования до нормативного ресурса техническое диагностирование применяется ограниченно, в основном, чтобы уберечь механическую систему от преждевременного отказа. Только при стратегиях технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию методы технического диагностирования используются широко, влияя, как на периодичность контролей и ремонтов, так и на объем ремонтных воздействий. Кроме этого, задача более полного использования (выработки) технического ресурса позволяет с помощью технического диагностирования влиять на производство, переводя работу оборудования в «щадящий» режим, при котором замедляется интенсивность деградационных процессов.

Учитывая все вышесказанное, 2-я часть данного пособия посвящена алгоритмам диагностирования ТС с применением риск-анализа, который частично был рассмотрен в разделе 7.1 1-й части.

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА**

1. **Понятие безопасности оборудования как показателя его качества и технического состояния**

Безопасность оборудования с одной стороны является составляющей промышленной безопасности и черпает отсюда нормативную базу, а с другой стороны – это один из показателей надёжности и связан с ней методически. Актуальность проблемы технической безопасности обусловлена тем, что безопасность производства регламентирована стандартами ИСО, соблюдение которых требуется при сертификации продукции металлургических предприятий . Предпосылкой актуальности проблемы безопасности служит тенденция продления сроков эксплуатации технологических и транспортных систем, выработавших назначенный (амортизационный) ресурс. В металлургии, где велик износ основных фондов, многие объекты не могут быть замещены новыми системами по экономическим мотивам, но они и не исчерпали технический ресурс, резервы которого следует установить. Подобные работы ведутся в металлургическом производстве для тяжёлых прессов и целесообразны при модернизации прокатных станов, станины которых имеют существенный резерв циклической прочности после 40-50 лет эксплуатации.

Методы оценки безопасности развились из строительной механики, когда в 1959 году В.В.Болотин впервые применил статистическую теорию для оценки сейсмического риск [1]. С тех пор понятие безопасности как синоним надёжности стало применяться для технических объектов, эксплуатация которых предусмотрена до предельного состояния. На настоящем этапе эти термины стали разниться.

Переход от надежности к безопасности совпал по времени с внедрением концепции приемлемого риска, отразившей необходимость создания экономных по энерго - и материалоёмкости, а так же по техническому обслуживанию машин и конструкций. Потребителя интересует не столько собственно надёжность, сколько минимизация ущерба от отказов. То есть важна функция (результат), которую реализует надёжность, а не сама она как средство. Поскольку для сложных технических систем (а таковыми являются силовые конструкции металлургического оборудование, имеющие много потенциально опасных мест и воздействующих на них повреждающих процессов) абсолютная надёжность недостижима, то для них следует обеспечивать необходимый уровень безопасности, назначение которого тесно связано с риск-анализом [2] .

О преемственной связи между оценкой безопасности и прочностными расчетами свидетельствует то, что акад. С.П.Королев под запасом прочности понимал коэффициент безопасности, предназначение которого – а) учет случайного разброса параметров объекта, б) компенсация несовершенства расчетной методики]. Акад. А. Р. Ржаницин, предложивший определять вероятность безотказной работы посредством сравнения показателей несущей способности и нагрузки, статистический запас прочности называл “характеристикой безопасности”. Следует отметить, что надёжность имеет дело с разномасштабными потоками отказов. Если объектами надёжности являются, практически, все элементы технической системы, то объектами безопасности являются базовые несущие конструкции и ответственные детали, отказ которых сопряжён с потерями большими, чем стоимость самих деталей.

В задачах безопасности анализируется не партия изделий, а каждое изделие в отдельности. Осуществляется индивидуальное прогнозирование, лежащее в основе стратегии обслуживания по техническому состоянию. При этом вероятностно-физические методы прочности используют байесовскую трактовку вероятности как меру уверенности в истинности суждения. Это даёт основание использовать вероятность безотказной работы в качестве меры безопасности.

Непонимание этого положения некоторое время сдерживало внедрение вероятностных методов расчёта для уникальных объектов. В конце 80-х годов ХХ ст. в среде прочнистов дискутировался данный вопрос. В частности, такие специалисты, как Л.В.Коновалов и А.И.Сурков, выражая определенный скепсис, говорили о «необходимости дать трактовку понятия вероятность отказа для крупногабаритной детали единичного исполнения, поскольку заказчик может не понять информацию о том, что поломка произойдет для 10% валов из общего количества и будет требовать запасной вал именно для своего экземпляра машины» [4]. Данная коллизия преодолена в системе безопасности конструкций. Важной особенностью оценки безопасности является моделирование аварийных ситуаций, при которых конструкция подвергается сверхдопустимым повреждениям. Поэтому в историю нагружения вводятся перегрузки, происхождение которых не имеет существенного значения. В отличие от этого, оценка надёжности производится по нормативным или зарегистрированным режимам, которые не могут объяснить, а методы не могут учесть появления перегрузок.

Стоит также обратить внимание, что с точки зрения диагностики методы надежности более успешно оценивают исправные состояния, а в системе безопасности прогнозируются работоспособные состояния. Как известно, неисправные состояния определяются параметрическими отказами, а работоспособные состояния – целостностью элементов системы. Тем самым наметилось эволюционное разделение излишне размытой проблемы надежности машин на более обособленные направления – параметрическую надежность[3] и безопасность [2]. Каждому из них присущи разные виды отказов: в вопросах безопасности силовых систем страхуются от разрушений, а при обеспечении надёжности рассматриваются все вилы отказов. Причём параметрические отказы, как правило, связаны с износом, который в системе безопасности играет роль условий эксплуатации.

Для каждого направления характерны свои признаки, которые с некоторой долей условности позволяют определять взаимоадекватность методов и задач (рис.1.1). Например, концепция проектирования оборудования должна быть увязана со стратегией его обслуживания и утилизации. Неконроллепригодное, рассчитанное по запасам прочности на неопределенно–длительный срок оборудование сложно и малорезультативно оснащать средствами диагностики, так как оно спроектировано в предположении абсолютной безопасности. Вместе с этим, применение встроенных систем мониторинга работы машины, ориентированных на обслуживание по техническому состоянию, избавляет конструктора от излишнего консерватизма, позволяя создать экономное по материало – и энергопотреблению оборудование.

Причины ее эффективности обусловлены задачами, возложенными на техническую диагностику (ТД). К ним относятся контроль ТС, поиск неисправностей и прогнозирование ТС. Сообщения в литературе о начальном опыте применения ТД в металлургии имели сдержанный характер, указывая на сравнительно скромную (до 10%) экономию затрат на ТО [5]. На наш взгляд, такой эффект обусловлен автоматизацией поиска неисправностей (2 задача ТД).

Дальнейшее развитие ТД сняло вопрос о целесообразности обслуживания металлургического оборудования по ТС, поскольку задача контроля ТС способствует исправности машин, что снижает брак продукции. Решение таких технологических задач стало главным аргументом в оснащении новых металлургических агрегатов автоматическими системами контроля его работы, которые фиксируют тысячи диагностических показателей. Распознавание исправного и неисправного ТС производится автоматически (1 задача ТД).

Рис. 1.1 Задачи и методы обеспечения надежности и безопасности силовых систем

**Базовые и ответственные элементы**

**механических систем**

**Объёмное**

**разрушение**

**Риск-**

**безопасность**

**Вероятностно-физические**

**Математико-**

**статистические**

**Прогнозирование-**

**предупреждение**

**Приемлемый**

**риск**

**По техническому**

**состоянию**

**Безопасность**

**Прочность**

**Надёжность**

**Абсолютная**

**безотказность**

**Выявление-**

**устранение**

**Планово- предупредительный ремонт (частично)**

**Поток**

**отказов**

**Объёмные и**

**поверхностные**

**явления**

**Концепция**

**проектирования**

**Концепция**

**технического**

**обслуживания**

**Система**

**технического**

**обслуживания**

**Методы оценки**

**показателей**

**Трактовка**

**вероятности**

**Виды**

**отказов**

**Объект**

**Элементы**

**технических систем**

Современное оборудование в аспекте ТД коренным образом отличается от металлургических машин и агрегатов, созданных 30 – 50 лет назад и находящихся ныне в эксплуатации. Если для последних невозможно отследить историю эксплуатации, то для первых - эксплуатационной информации настолько много, что обслуживающий персонал затрудняется ее воспринимать. Наблюдается явление, получившее термин «сингулярность информации», когда ее объем непрерывно нарастает, но из-за неиспользования она теряет смысл.

Выход из этой ситуации видится в нацеливании автоматизированных систем контроля на прогнозирование ТС (3 задача ТД). Данная задача относительно слабо проработана в металлургии. Однако, эффективность от ее решения существенно выше, нежели первых двух, поскольку она позволяет снизить периодичность и объем капитальных ремонтов, продлить кампанию металлургических агрегатов. Эффект ощущается далеко не сразу, но соответствующую обработку информации об условиях эксплуатации необходимо производить от начала функционирования механической системы.

Проблема прогнозирования успешно решается, когда контролируется прямой диагностический показатель, непосредственно связанный с повреждением (линейный или «массовый» износ, плотность или пористость при усталости, трещина при разрушении) или с исправностью механической системы (технические характеристики). Впрочем, и в этой ситуации имеется проблема заблаговременности прогноза, обусловленная тем, что зачастую диагностический показатель приближается к критическому значению за очень короткий временной интервал.

Прогнозирование работоспособного состояния металлургических машин и агрегатов, в основном, обусловлено оценкой интенсивности накопления рассеянного усталостного повреждения. Это расчетный диагностический показатель, зависящий от многих факторов. Настоящие разделы посвящены ***поиску показателя ТС, одинаково чувствительного к наработке на всех ее периодах, с помощью которого*** возможно прогнозировать работоспособные состояния механических систем.

## 1.1 Сущность ресурсной механики

Долгие годы обеспечение надежности технологических машин при проектировании было опосредствовано через оценку напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и обоснование их запасов прочности *nσ.* Регламентировано минимальное значение этой величины – несколько большее единицы. По максимуму величина *nσ* не ограничена. Фактически она устанавливается из конструктивной целесообразности, чтобы соблюсти требуемые параметры механизмов. Невзирая на произвольно сформированные таким подходом многократные запасы прочности, оборудование не застраховано от внезапных разрушений.

Привлечение в инженерную практику вероятностных методов расширило трактовку запасов прочности. Понимание того, что при *nσ*=1 разрушение произойдет в 50% случаев, снизило степень консерватизма при проектировании, но, естественно, не повысило безопасность. Вероятностная трактовка запаса прочности, несмотря на ее результативность по сравнению с детерминированной оценкой, не дает возможности судить об ожидаемом числе разрушений, и значит, не дает возможности нормировать величину *nσ..*

В этом аспекте более продуктивен такой показатель, как вероятность безотказной работы (ВБР) или безопасность *R*. Обычно они трактуются, как вероятность того, что несущая способность (прочность) конструкции *σ* превышает действующую на нее нагрузку *S*, то есть – вероятность события *σ - S > 0*. Подобная интерпретация безусловно справедлива для отказов внезапного типа, но распространение ее на постепенные отказы (усталость, износ) некорректно, поскольку здесь векторы *σ*  и *S* перестают быть независимыми.

Этих недостатков лишен ресурсный подход, при котором ВБР устанавливается при сравнении пары наработка *nΣ* - долговечность *n0* [6]. Необходимость создания экономного по материало- и энергоемкости оборудования, переход к системе его обслуживания по фактическому техническому состоянию, вынужденное стремление обезопасить выработавшие амортизационный срок конструкции, которые невозможно заменить, заставили обратиться к более ясным для потребителя показателям ресурсного происхождения. Изучение физической природы надежности материалов и конструкций привело к появлению новых уравнений предельного состояния. Процессы развития повреждений различного типа и природы могут быть объединены в рамках ресурсной механики, которая характеризуется такими

Идея реализации машин посредством принципами.

1. Проектирование на заданный ресурс, когда размеры сечений устанавливаются по долговечности, а не проверяются по запасам прочности.
2. При эксплуатации поддержание безопасности осуществляется по концепции поэтапного назначения ресурса.
3. При этом ВБР оценивается на основании ресурсного подхода.

Таким образом, ресурсная механика машин изучает ресурсные свойства, как механических систем в целом, так и ее элементов в отдельности.

В отличие от аппарата запасов прочности, ресурсная механика эффективно воспринимает новые возможности по углублению расчетов, открывающиеся с появлением современных пакетов автоматизированного проектирования. Иходя из концепции поэтапного назначения ресурса, методология его оценки должна обладать свойством уточнения прогноза. То есть параметры рассеяния итоговой функции распределения долговечностей должны быть чувствительны не только к изменению средних исходных показателей эксплуатационного процесса и сопротивляемости механической системы, но и к вариации этих показателей, вследствие наработки.

Суть ресурсной механики состоит в том, что объекты проектируются на гарантированно назначенный ресурс, а в процессе эксплуатации, благодаря идентификации моделей старения (выявление детерминированной компоненты в априорно стохастических свойствах эксплуатационного процесса и механической системы), происходит переоценка технического состояния, устанавливается более точный (с меньшим рассеянием) исходный ресурс, а далее определяется последовательность остаточных ресурсов. Это дает возможность спроектировать материалоэкономное изделие с требуемым уровнем надежности, а на стадии эксплуатации – обеспечить безопасность при наиболее полном исчерпании ресурса (рис.8.1, часть 1).

1. **Модели надежности и безопасности в аспекте контроля**

**технического состояния**

Надёжность является важнейшим свойством технических систем, определяющим их качество. Существует пять групп показателей для характеризации этого свойства, что свидетельствует о его комплексности. Несмотря на это, большинство специалистов для количественной оценки надёжности используют вероятность безотказной работы (ВБР) R. Для оценки технического состояния дорогостоящих объектов длительного ресурса применяют оперативные показатели риска и безопасности : . Они также определяются при помощи ВБР: . В область практически интересных уровней надёжности, порядка 0.001…0.05, когда требуется принимать решение о продлении или прекращении эксплуатации объекта, для определения риска с ошибкой не более 5% можно использовать формулу. Таким образом, ВБР может характеризовать как надёжность, так и безопасность технических систем.

Настоящие исследования посвящены анализу методов определения ВБР и имеют своей целью выбор алгоритма её нахождения, который был бы пригоден для диагностирования технического состояния объектов, эксплуатация которых связана со значительным потенциальным ущербом от отказа. К таковым объектам, как правило, относятся уникальные технические системы, для которых не существует, представительной информации об их отказах, невозможно провести испытания на надёжность такого объекта как единой системы. Следовательно, нормативные апробированные математико-статистические методы для них непригодны. Поэтому оценка ВБР должна базироваться на минимальной апостериорной информации об эксплуатации объекта и должна учитывать изменение ВБР во времени. Подобным требованиям соответствуют вероятностно-физические методы исследования надёжности, связанные с природой отказа. С их помощью можно провести анализ надёжности отдельных структурных элементов технической системы, что экономнее, чем её отработка в целом. Кроме этого, появляется больше информации о слабых звеньях системы.

Однако, природа отказов существенно различна, деградиционные процессы в структурных элементах подчиняется разнообразным, в том числе противоречивым, закономерностям. Возникает опасность нарушения единой методологии надёжности, основанной на теории множеств. Избежать это позволяет ресурсный подход к оценке ВБР, который тесно связан с концепцией приемлемого риска [4].

## Методы нахождения вероятности безотказной работы

В общем случае безотказная работа определяется условием непревышения действующего диагностического показателя своих допустимых значений , следующих из свойств технической системы:

, (2.1)

где и - плотности вероятности распределений величин F(x) и F(X).

Для различных сочетаний законов F(x) и F(X) имеются готовые решения для (1), которыми пользуются при вычислении ВБР.

В инженерной практике механических систем получил распространение метод, при котором ВБР оценивается по площади перекрытия графиков плотностей распределения f(X) и f(x) ( (штриховка, рис.2.1) [7]:

, (2.2)

Тогда ВБР определяется неравенством:

(2.3)

Данный метод удобен, поскольку позволяет с минимальным риском установить предельную при диагностике величину . Также для инженерных задач удобен метод нахождения ВБР из графиков *F(x)* и *F(X)*, тогда значение *R* устанавливается из условия (рис. 2.2). Этот метод целесообразно применять при недостаточном объёме эмпирических данных, а также когда выборка формируется, например, методом Монте-Карло и закон её распределения произвольный. Поскольку практический интерес представляет правая ветвь графика *f(x)* и правая ветвь графика *f(X)*, то для оценки ВБР используют асимптотические распределения максимальных значений *х* и минимальных значений *X*.

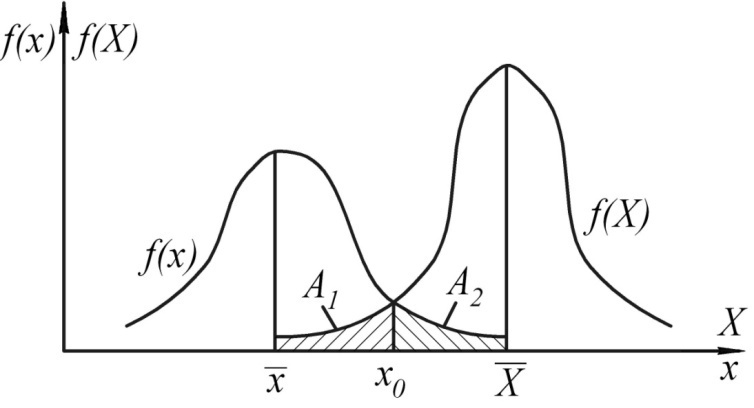


Рис. 2.1. Плотность вероятности распределения величин и

Рассмотренные методы пригодны лишь для отказов внезапного (однократного) типа и не годятся для отказов постепенного типа, что хорошо понимают специалисты по общей теории надёжности. Несмотря на это, представители вероятностно-физического направления надёжности пытаются адаптировать данные методы поиска ВБР для кумулятивных процессов, например, усталостного разрушения. В подобном случае неясно, что же принимать за величину . Очевидно, что медианное значение спектра напряжений для этого не подходит. Разработчики методов расчёта деталей машин на ограниченную долговечность считают, что отказ связан с вариациями предела выносливости (в качестве свойства механической системы *X*) и только максимальных (а не всех действующих, как в спектре) напряжений блока [8]. Тогда в качестве значений следует принимать медианное значение , что носит условный характер. Но самое главное, это максимальное значение может десятки тысяч раз превышать минимально возможные значения , а разрушения не произойдёт. Для преодоления этой коллизии предложено последовательно снижать предел выносливости, придав вероятностную трактовку характеристике и связав её со временем наработки *t* [7]. В такой методике, получившей название «метод квантиля»[8], устанавливается сразу ВБР, хотя продуктивнее было бы предварительно получить функцию распределения долговечностей. Последняя, являясь обратной функции вероятности отказа, служит исходной для получения изменения ВБР во времени *R(t)*.

Проблема могла бы решаться довольно просто, если в качестве значения принять некое эквивалентное напряжение , методики получения которого хорошо отработаны. Но тогда возникает вопрос, как установить его вариацию. Предлагается коэффициент вариации этого внешнего фактора принимать по вариации величины равной 0,1, или же приравнять его вариации предела выносливости [7]. Оба варианта безосновательны.

Наряду с нелогичностью подхода, основной недостаток метода оценки надёжности при постепенных отказах как вероятностной прочности связан с невозможностью корректного учёта фактора времени, поскольку моделирование деградационного процесса предполагается не случайными процессами, а случайными величинами. Поэтому целесообразно оценивать ВБР по кинетическому процессу накопления повреждений посредством сравнения их текущих и допускаемого значений. Подобный метод эффективен, когда диагностический показатель напрямую связан с природой отказа (износ, трещина). Тогда допустимая величина (предельный износ, критический размер трещины) постоянна. В общем же случае предельная величина зависит от процесса , а кроме этого, для явления усталости она представляется неоднозначно.

В связи с этим широко употребимы математико-статистические методы оценки ВБР по интенсивности потока отказов. Например, при независимости случайных процессов изменения факторов и распространены непараметрические экспоненциальные модели:

, (2.4)

где – накопленное повреждение в виде относительной долговечности;

– ВБР при мгновенном отказе.

Данная модель расходится с экспериментальными данными о распределении долговечностей при значительных повреждениях, порядка *a =* 0.1 и выше. То есть, когда объект по времени входит в зону эксплуатации с риском, близким к предельному, и необходимо решать вопрос о его эксплуатации или восстановлении.

Подобные модели могут быть построены на основании распределений Вейбулла, Эрланга, усечённому слева, обратному гауссовскому, но для их обоснования необходимо большое количество статистических данных об эксплуатационных отказах. Применительно к уникальным объектам длительного ресурса и повышенного риска такая информация отсутствует.

Для количественной оценки надежности большинство специалистов используют вероятность безотказной работы (ВБР), которая при некоторых допущениях может характеризовать и безопасность *R*. Изменение ВБР во времени обычно называют функцией надежности или безопасности *R(t)*, которая совместно с алгоритмом ее нахождения, учитывающим количество и вид отказов, образует соответствующую модель.

Процесс эксплуатации характеризуется временем наработки *tΣ* или числом циклов наработки *nΣ* , что ведет к накоплению повреждений, мерой которых обычно выступает относительная долговечность: *a= tΣ/T= nΣ/N.* Для оценки ТС ВБР должна быть чувствительна к этому показателю.

Наиболее часто функцию надежности представляется экспоненциальным уравнением:

*Rd=exp(-a)*

(основное уравнение надежности по И. А. Биргеру). Оно достаточно чувствительно к наработке (рис.2.2, а), но дает расхождение с экспериментально получаемой функцией распределения долговечностей (ФРД). В частности, наиболее надежно и наименее трудоемко определяемая средняя величина ресурса *T* должна соответствовать ВБР=0,5. Основное уравнение вычисляет более консервативный результат (табл. 2.1), что приемлемо для стадии проектирования, но не годится для контроля работоспособности. Кроме этого, данный метод не учитывает рассеяние ресурса (т.е. имеет детерминированный характер), и имеет «математическое» происхождение, не связанное с природой деградационного процесса.

В связи с этим функцию надежности или безопасности получают не только приведенным методом потока отказов, но и методом экстраполяции экспериментально обоснованной ФРД в область крайних вероятностей. Полученная таким методом из ФРД нормального типа искомая функция *R(t)*, являясь обратной ФРД, оказывается малочувствительной к наработке и накоплению повреждений, оставаясь, практически горизонтальной на 3/4 периода эксплуатации (рис.2.2, а, линия *T(R)*). Это делает ее непригодной в качестве диагностического показателя.

Попытки усовершенствовать метод потока отказов, распространив экспоненциальный закон надежности на ситуации со случайным характером моделей нагрузки и прочности, когда *Rr=exp[-a(1-R0)]* (при этом *R0*- ВБР для внезапного отказа), устремляют функцию надежности в горизонтальное положение (табл. 2.1).



Рис. 2.2. Связьмежду ВБР и накопленным повреждением в виде относительной наработки *a*=*t/T*, полученные по уравнению надежности *Rd*  и по ФРД *T(R)* нормального вида (а), а также изменение индекса надежности *β* при постепенном отказе (б) [9].

Таблица 2.1 Изменение ВБР в процессе эксплуатации, полученные по различным моделям

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *a* | Rd | Rг (R0=0,9) | RW10 | RW20 | RW |
| 0,25 | 0,779 | 0,975 | ~1 | 0,9999 | 0.996 |
| 0,50 | 0,607 | 0,951 | 0,9999 | 0,993 | 0.939 |
| 0,75 | 0,472 | 0,927 | 0,985 | 0,903 | 0.729 |
| 1,00 | 0,368 | 0,905 | 0,520 | 0,519 | 0.368 |

Более обоснованно использовать для аппроксимации распределения долговечностей иного закона, например, Вейбулла, который после его адаптации для применяемых координат выглядит так:

**** (2.5)

****.(2.6)

Выражения (2.5) и (2.6) получены для коэффициентов вариации ресурса, соответственно, vT*=0.1* и  *vT=0.2* по следующей методике*.* Параметры распределения Вейбулла



связаны со средним ресурсом *Т* и его коэффициентом вариации *vT* как:



C учетом того, что *a*=*t/T* получены вышеуказанные адаптированные выражения.

Однако и в этом случае метод нахождения функций *R(t)* по ФРД не избавляет функцию надежности от недостатка чувствительности к наработке (табл. 2.1). Более чувствительной к наработке оказывается функция надежности, полученная по закону Вейбулла в форме, рекомендованной для отказов вследствие усталости:



При таком решении наблюдается более компромиссная ситуация (табл. 2.1), но сохраняется тот же недостаток, что и при использовании основного уравнения надежности *Rd*.

Чтобы избежать этого недостатка используют понятие индекса надежности как функции времени (рис. 2.2, б) [9]:

 (2.7)

где *Ф*-функция Лапласа, а *Pf* –вероятность отказа.

Индекс *β* , по существу, является нормированным квантилем нормального распределения *uR* и не отражает физическую природу отказа.

Известно, что трактовка надежности или безопасности как вероятностной прочности корректна при внезапных отказах, и не является таковой при отказах постепенного типа. Для преодоления этой коллизии используют ресурсный подход. Например, Корнелл представляет индекс безопасности как [10]:

 (2.8)

где *T*  и  *t* – соответственно, средняя долговечность и текущая наработка;

*SlnT* – среднеквадратическое отклонение (СКО) величины *lnT*.

СКО *SlnT* определяется с учетом вариаций предельного повреждения, параметра кривой усталости и эквивалентного напряжения для случайного режима нагружения. Тогда по аналогии с (2.7) вероятность отказа постепенного типа будет *Pf=Ф(-β).*

Индексы надежности и безопасности могут характеризовать ТС в процессе эксплуатации, поскольку более чувствительны к накоплению повреждений и наработке, нежели собственно ВБР. Однако, индекс надежности (2.7) имеет прочностно-силовую трактовку, а индекс безопасности Корнелла (2.8) имеет ресурсно-усталостную трактовку. Поэтому сложно с их помощью сравнивать опасность от внезапных и постепенных отказов. Кроме того, алгоритм поиска распределения величины *lnT* [10] излишне консервативен, что не дает возможности уточнять ресурс при эксплуатации.

* 1. **Концепция допустимого риска и индекс безопасности**

**при постепенных отказах**

Концепция приемлемого (допустимого) риска, на которой базируется теория безопасности промышленных объектов, предусматривает поэтапное переназначение сроков службы: от проектного – к исходному, и далее – к остаточным ресурсам. Принципиально важным является положение, что остаточный ресурс должен определяться более высокой научно-методической точностью, чем проектный и исходный [11]. Идентификация модели деградации технического состояния механической системы позволяет уточнить остаточный ресурс и тем самым повысить безопасность эксплуатации.

Система обслуживания по техническому состоянию базируется на концепции приемлемого риска. Для определенного элемента механической системы, на основании допускаемой в отрасли величины потерь за время эксплуатации в виде приемлемого риска *[ρ]* и интенсивности потерь от отказа данного элемента *Ii* с размерностью [ущерб/ авария], показывающей значимость элемента, устанавливается требуемый уровень безопасности:



Этот уровень можно и непосредственно назначить как необходимую ВБР, или же находить из оптимальных рисков и сроков эксплуатации. При оценке ВБР посредством сравнения пары «наработка *t*- ресурс *Т*» информативный смысл имеет гарантированный запас долговечности *nNR*как отношение минимального ресурса *Т1-R* для вероятности разрушения *Pf =1-R* к максимально вероятной наработке *tR*. Используя логарифмические координаты, определяем индекс безопасности как логарифм гарантированного ресурса (рис. 2.3):



где *nO* и *nΣ* – число циклов нагружений, соответствующее ресурсу T и наработке t;

и - коэффициенты вариации, соответственно, ресурса и наработки.



Рис. 2.3. Схема оценки показателей безопасности при контроле технического состояния в моменты  и  по функциям индекса безопасности 1 и распределения срока службы 2.

В начале эксплуатации, когда наработка *t0=0* , индекс безопасности максимален и равен *βR=lgT1-R*. График функции безопасности *βR(t)* представляет прямую с наклоном под 450. Для оценки ТС путем контроля величины *βR* нужно знать ФРД и коэффициент вариации наработки *vt*. В момент контроля *ti* , отложив по оси абсцисс величину *lg(ti+uR∙vt)*, по графику *βR(t)* получаем текущее значение индекса безопасности. Его уменьшение прямо пропорционально гарантированной наработке.

Под влиянием воздействий ремонтно-технического обслуживания ход графика *βR(t)* скачкообразно изменяется (рис. 2.4). Видно, что при поэтапной переоценке ресурса за счет его уточнения и достоверизации (рис.2.4, а, в) снижение функции безопасности *βR(t)* происходит не столь интенсивно, как при предупредительной замене элемента (рис.2.4, б). Для базовых и ответственных элементов механической системы переоценка ресурса (контроль ТС), очевидно, дешевле, чем их замена. Установлено, что с уменьшением интервала между контролями уменьшается вариация интенсивности деградационного процесса [12], что на графике *βR(t)* отражается как учащение и снижение амплитуды скачков.

Теоретически, можно предположить, что при сплошном мониторинге нагружения линия *βR(t)* будет возрастать.

На практике поддержание безопасности осуществляется, прежде всего, посредством контроля ее индекса. Для замедления процесса потери работоспособности, в котором имеется реальный и квазиреальный (детерминированный и статистический) компонент, ремонт и диагностика выступают наравне. Однако, при втором способе выше степень выработки ресурса, которая обратно пропорциональна гарантированному запасу долговечности и определяется через индекс безопасности как *rR=10- βR* .

При *βR=0* элемент механической системы следует снимать с эксплуатации. После этого остается невыработанной некоторая «рискованная» часть ресурса. При этом степень его выработки определяется посредством ФРД:



Степень выработки среднего ресурса будет выше, если снижать уровень безопасности *[R]* и увеличивать срок службы (при этом уменьшается величина *vlgT*). Практически, используя контроль индекса безопасности *βR* , величина *r* достигает 90%.





Рис. 2.4. Схема формирования индекса безопасности *βR* по распределениям наработки *tΣ(uR)* и срока службы *lgT(-uR)* для допустимой безопасности *[R]* с квантилем *u[R]* в момент контроля *ti (t0* – исходное состояние) путями уточнения (а) и достоверности (б) ресурса, восстановления безопасности заменой, где время *timax* соответствует максимальному использованию ресурса

Таким образом, информация о работе оборудования становится, наравне с материальными ресурсами, реальным фактором производства, влияющим на его эффективность.

**2.3 Индекс безопасности при мгновенных отказах**

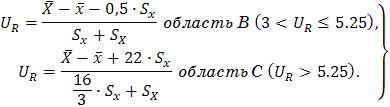
**Ресурсная трактовка ВБР** при мгновенных отказах реализуется посредством его вычисления через среднее число выбросов в единицу времени, которое выражается двумерной функцией плотности вероятности диагностического показателя и его интенсивности. Тогда ресурс (долговечность) связан с периодами появления выбросов, кривую которых (рис. 2.5) можно получить, зная их закон распределения.

Для этого используют асимптотические распределения экспоненциального и двойного экспоненциального типа [1]:

(2.9)

где *P* – вероятность, – среднеквадратическое отклонение (СКО) показателя в нормальных условиях эксплуатации.

В координатах квантиль нормального распределения вероятности – СКО графики распределения выбросов могут быть аппроксимированы прямыми участками (рис. 2.5), из которых ВБР может быть найдена по квантилям как:



Правомерность использования данной аппроксимации для выбросов подтверждено путём сравнения прогнозируемых и фактических сроков службы деталей механической системы пилигримового трубопрокатного стана, эксплуатация которой характеризуется перегрузками (см. разд. 6.1) .

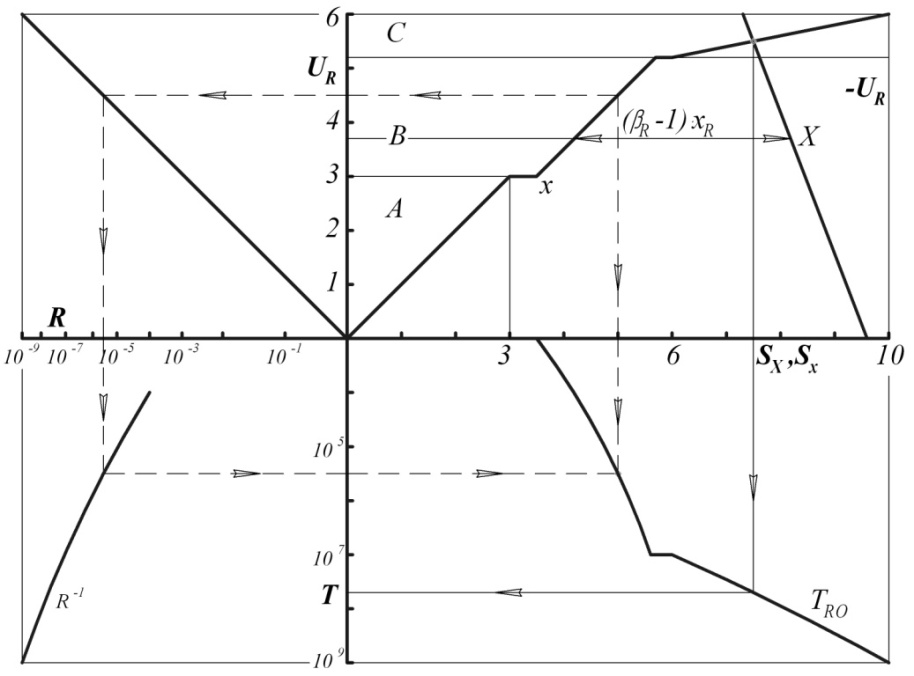


Рис. 2.5. Схема формирования:

а) показателей безопасности  и  при внезапных отказах для периодично-случайных процессов изменения величины , распределение которой линеаризовано в областях нормальных (проектных) (А), запроектных (В) и экстремально-аварийных (С) условий эксплуатации;

б) кривой периодичности появления выбросов  (пунктирные стрелки) и долговечности  при однократном воздействии для распределения допустимой величины  (сплошные стрелки).

Избежать противоречий при получении функций надёжности и безопасности для отказов постепенного типа возможно, если в качестве показателей и использовать непосредственно время наработки и ресурс (долговечность, срок службы) . Тогда ВБР определяется при сравнении пары наработка - ресурс по их функциям распределения (рис. 2.6). В принципе, при таком подходе нет необходимости оценивать надёжность посредством ВБР, которая на протяжении большего периода эксплуатации нереальна (хоть и высока, но не проверяема и имеется шанс отказа).

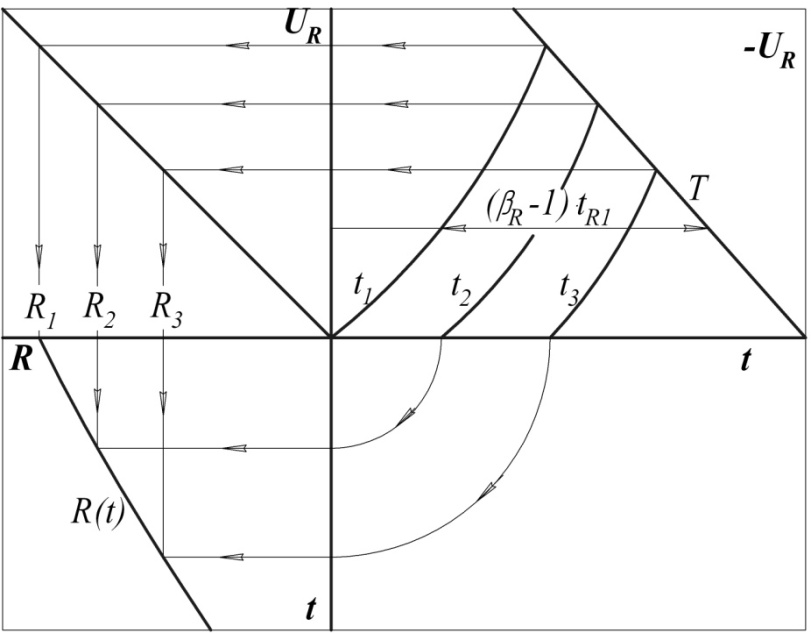


Рис. 2.6. Схема формирования показателей , и функции безопасности  при постепенных отказах по функциям распределения фактического времени наработки  и прогнозируемого срока службы .

Благодаря ресурсным моделям ВБР гармонизируется оценка показателей надёжности и безопасности при постепенных и внезапных отказах. Для первых – формальный подход дополнятся физическим смыслом, а для вторых – безопасность становится функцией времени эксплуатации. Тогда риск и безопасность можно использовать для оценки технического состояния силовых систем.

**Пример.**

Вопрос продления ресурса решается после оценки технического состояния базовых несущих конструкций. Замена этих конструкций за время назначенного срока эксплуатации не предусмотрена. Возможен лишь ремонт или модернизация некоторых элементов базовых конструкций. Поскольку риск от их разрушения велик, продление ресурса связано с прогнозированием безопасности эксплуатации. Критерием безопасности является сохранение целостности основных несущих элементов конструкций. Для автомотрис такими элементами являются продольные балки, изготовленные из швеллеров №24 или №30 (в зависимости от типа путевой машины).

Обоснование продления срока службы представляется частным случаем теории безопасности, практически воплощаемой концепцией переназначения ресурсов.

После 30 лет эксплуатации и выработки назначенного ресурса можно считать, что для рам автомотрис индекс *β98*≈0. Проведя комплекс ходовых и лабораторных испытаний были рассчитаны продленные ресурсы и получены функции *β98(t)* для сопротивления усталости (рис.2.7). Разница в сроках продленной эксплуатации двух типов автомотрис обусловлена существенным различием в режимах нагружения, зарегистрированных в наиболее опасных элементах рамы. С учетом повторяемости скоростных режимов и движения по типам путей (криволинейные участки, стрелки) получены обобщенные параметры процесса нагружения, который включает медианное значение амплитудного напряжения изгиба *σa*, его СКО *Sa*, коэффициент асимметрии цикла *Rσ*  и эффективную частоту процесса *fe* (табл. 2.2).

Параметры основного процесса нагружения рам Таблица 2.2

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип автомотрисы | *σa*, МПа | *Sa*, МПа | *Rσ* | *fe*, Гц |
| АДМ | 32 | 8,5 | 0,11 | 2,2 |
| ДГКу | 9,2 | 2,4 | 0,71 | 2,3 |

Малые амплитуды процесса (рама ДГКу) ведут к тому, что расчет на усталостную долговечность дает нереально длительные сроки эксплуатации. Никто не возьмет на себя ответственность на такое продление, поскольку невозможно учесть деградацию свойств и гарантировать сохранение параметров нагружения. В данном случае следует обратить внимание на высокую величину σ, которая свидетельствует о немалых максимальных напряжениях цикла. В таких условиях появляется вероятность внезапного отказа при однократном разрушении от перегрузки. Выше было показано, как формируется кривая периодичности выбросов по функции распределения нагрузок в запроектной и экстремально-аварийной областях. Сравнивая данную функцию с функцией распределения прочности, получают гарантированный ее запас, который зависит от времени эксплуатации. Такая величина пригодна для оценки текущей безопасности, но некорректна при сопоставлении ее с индексом безопасности, поскольку имеет прочностную природу. Для преодоления этого недостатка следует придать индексу безопасности при внезапном отказе ресурсную интерпретацию. Такая возможность появляется, если использовать условную ФРД при однократном разрушении.



Рис. 2.7. Изменение индексов безопасности при ее уровне *[R]=0,98* для отказов постепенного типа (сплошные) рам автомотрис при исчерпании назначенного ресурса и после его продления (4 – автомотриса АДМ, 5 – автомотриса ДГКу), а также для отказов внезапного типа (пунктир) при длинах краевой трещины 20 мм(1), 10 мм (2), 0 мм (3) в раме автомотрисы ДГКу.

Используя методы механики разрушения, можно получить взаимосвязь между размером дефекта (трещины) и напряжением разрушения (1, рис. 2.8). Имея данную взаимосвязь, с помощью кривой выбросов получают диаграмму статической долговечности для внезапных отказов (2, рис. 2.8). Эту диаграмму можно представить в кусочно-линейных функциях с показателем наклона кS (2, рис. 2.9). Зная коэффициент вариации *v*f и СКО Sf напряжения разрушения, можно найти СКО величины lgnOS: 

Приняв гипотезу о логнормальности распределения статической долговечности nOS, ФРД в координатах up – Slgnos будет выглядеть прямой линией (1, рис. 2.9). Тогда по размеру возможного дефекта, установив для него напряжение разрушения элемента конструкции σf, находят сначала величину , принимаемую за медиану, а затем и гарантированное значение lgnOSR (стрелки, рис. 2.7). Ее величина определяет положение функции βR(t) при внезапном отказе (пунктир, рис. 2.7).

При проведении подобного риск – анализа для рамы автомотрисы ДГКу вариация величины σf назначена по вариации критического коэффициента интенсивности напряжений KIC в размере *v*f=0,1, для полулогарифмических координат показатель наклона определен как кS=0,025 МПа-1 (средняя часть кривой). Из результатов анализа видно, что трещины длиной более 20 мм не допустимы в опасных местах рамы при продлении ресурса (1, рис. 2.7). С трещинами длиной до 10 мм возможно продление ресурса на 20 лет, хотя их рост при циклическом нагружении не анализировался (2, рис. 2.7).

Экономический эффект от продления ресурса по всему парку обследованных путевых машин (464 единицы) составил более 70 млн. гривен, что намного превосходит экономию затрат на ТО и ремонт, которую можно получить при решении первых двух задач ТД.

**Выводы**

1. Современное металлургическое оборудование имеет достаточный уровень автоматизации и информатизации, а возможности средств диагностики таковы, что совместно оба фактора могут обеспечить надежное (заблаговременное, достоверное и точное) прогнозирование работоспособного ТС и безопасную эксплуатацию. Однако, такая задача ТД еще недостаточно полно решается в практике металлургического производства, очевидно, вследствие недооценивания возможности материализации рисков и кажущейся сложности налаживания диагностических алгоритмов.

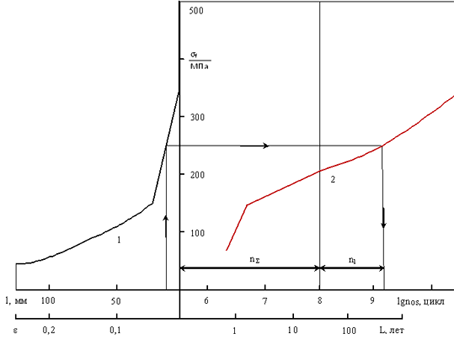


Рис. 2.8. Зависимость напряжения разрушения σf от абсолютной l и относительной ε длины краевой трещины в швеллере №30 при KIC=50 МПа∙√м (1), кривая долговечности *nOS* или срока службы *L* (2), а также принцип определения остаточного ресурса *nl* при внезапных отказах по наработке *nΣ.*

1. Рассмотрев вопросы продления ресурса реальных конструкций, можно сделать вывод, что оценка работоспособности механических систем по показателям безопасности более состоятельна, чем по показателям надежности, так как первые учитывают наличие дефектов и выбросов процесса нагружения (перегрузок). Благодаря этому установлено, что для конструкций длительного срока службы, подвергающимся незначительным усталостным повреждениям за характерный отрезок времени, ресурс ограничивается риском внезапного отказа.
2. Для отказов внезапного типа разработан алгоритм поиска индекса безопасности в его ресурсной интерпретации. Это позволяет сравнивать риски эксплуатации при отказах усталостного характера и при отказах от однократных перегрузок.



Рис. 2.9. Нахождение условной функции распределения долговечности при внезапном отказе 1 с помощью кривой статической долговечности 2 по напряжению разрушения элемента конструкции *σf* для допустимой безопасности *[R]* с квантилем *u[R].*

**3. Безопасность систем элементов и повреждающих процессов**

Рассматриваемая концепция контроля технического состояния посредством индекса безопасности использует принцип «слабого звена», который пригоден для простых технических систем. Для них отказ (разрушение) элемента *i* ведет к потере работоспособности (эффективности) всей системы. Реальные механические системы технологического оборудования не всегда удается представить как простые, поскольку в нем имеется ряд ответственных деталей, подвергающихся воздействию нескольких повреждающих процессов *j*. Поэтому при мониторинге технического состояния возникает необходимость перехода от частных показателей риска – безопасности *ρij*, *Rij* к обобщенным рискам *ρΣ* и безопасности *RΣ* системы.

При взаимозависимых повреждающих процессах необходимо получить модель долговечности (ресурса) *TΣ* для совместного их действия, после чего для оценки индекса безопасности *βRj* и ВБР *Rj* следует использовать ФРД *TΣ(R).* При независимости воздействия повреждающих процессов или состояния элементов ВБР (безопасность) системы оценивается по правилу произведения:

*RΣ=*Π*Rij*.

Общеизвестен недостаток этого правила, связанный с необоснованно низкой оценкой с его помощью надежности системы при росте числа элементов *i* и *j*. Несколько сдерживает неподтверждаемое практикой падение величины *RΣ* использование для ее вычисления, так называемого, уравнения цепи:

,

где *n* - число элементов *i* и *j*, справедливое для простых технических систем.

Одна из причин такого противоречия состоит в игнорировании фактической взаимозависимости элементов.

Используя коэффициент взаимозависимости элементов *Zn* , Е. С. Переверзев предлагает определять ВБР системы как:

 (3.1)

Если первое слагаемое в этом уравнении падает с ростом *n*, то второе, наоборот, растет, поскольку растет и *Zn*. это удерживает *RΣ* примерно на одном уровне. Чтобы преодолеть рассмотренный парадокс (термин Е. С. Переверзева), необходимо оценивать надежность всего объекта в целом, не разделяя его на элементы. Для этого следует производить испытания всей конструкции, что не всегда экономически целесообразно. Кроме этого, необходимо искать специфические диагностические признаки. Это ограничивает использование стратегии технического обслуживания с контролем надежности на однотипные изделия, для которых имеются полученные по аналогам характеристики оценки надежности систем.

**3.1 Показатель риска для систем**

Оценить состояние сложных и простых систем по показателям отдельных их элементов позволяет риск – анализ. В общем виде риск системы *ρΣ* можно определить по формуле полной вероятности  где - вероятность отказа (риск) *i* – го элемента, имеющая смысл частоты аварий, а *Ui* – некий уровень значимости [12]. Если *Ui* выразить через натуральный ущерб, то данное выражение представляет каноническую трактовку риска, измеряемого через ущерб в единицу времени (5).

Для функции надежности экспоненциального вида в области высоких вероятностей



Откуда следует, что *aij=ρij*, то есть накопленное повреждение вполне характеризует риск эксплуатации и потерю работоспособности. Тогда возможно определять риск системы как

.

Поскольку *aij* изменяется со временем наработки, то подобно изменяется и величина *ρΣ*.

Чтобы избежать вычисления ущерба в натуральных единицах, удобно использовать для *Uij* относительные величины. Применяя в этом качестве отношение безусловной эффективности к эффективности идеальной машины, определяют надежность сложной технической системы [12]. Таким образом, решается противоречие, присущее правилу Π*Rij*, поскольку тогда коэффициент *Uij* характеризует уже систему в целом, но вероятность отказа *ρij* относится к отдельному элементу.

В практике обеспечения надежности известна процедура анализа последствий отказов FMEA, в которой критичность отказа элемента *Cij* оценивается в баллах. Тогда значимость *Uij* определяется через относительную критичность отказа:



Зная долю отказов соответствующей категории тяжести в возможных отказах системы *πij*, уровень значимости вычисляют как  Тогда  [12].

Если использовать ресурсную модель для определения ВБР, то в ней автоматически учитывается «временной» фактор эксплуатации, и необходимость контроля накопленного повреждения *aij* отпадает. Тогда для ФРД логнормального вида *lgTp* и для нормального закона распределения времени наработки *tp* риск системы с достаточной точностью можно определить как:

 (3.2)

где  и  - соответственно, средний логарифм ресурса и логарифм средней наработки, для элемента *I* и повреждающего процесса *j;*

*S* и *v* – соответственно, СКО ресурса и коэффициент вариации наработки.

При изложенных методах оценки риска с учетом потенциального ущерба возможны сложности с обоснованием предельной величины [*ρΣ*]. Без ее значения не возможно диагностировать работоспособные состояния. Более объективно оперировать с частотной составляющей риска *ρi*. Такой оперативной характеристикой риска выступает отношение вероятности отказа к ВБР:  [13].

Тогда предельная величина ρ’ будет равняться единице. Это происходит когда *R*=0.5, что указывает на бесполезность детерминированных расчетов для оценки безопасности. При диагностировании практический интерес представляют сроки наработки, когда *R*→0,98….0,95 и необходимо принимать решение о дальнейшей эксплуатации элемента. В таких областях оперативная характеристика риска, фактически, совпадает с вероятностью отказа:  Поэтому частотная составляющая рисков элементов может характеризовать безопасное состояние системы.

**3.2 Индекс безопасности для систем**

Тем не менее, сложности объективного установления предельных значений показателей риска совместно с их низкой чувствительностью к наработке, делает их неудобными в задачах прогнозирования ТС. Вычисление лишенного этих недостатков индекса безопасности для систем *βΣ* основано на его связи с повреждением, отражающим текущий риск эксплуатации. Учитывая, что гарантированный запас долговечности обратнопропорционален гарантированному повреждению  а индекс безопасности - его логарифм имеем:

 или .

Используя (6) окончательно получаем:

 (3.3)

где *βijp* – индекс безопасности *i* – го элемента для *j* - го повреждающего процесса, полученные по функции распределения ресурса и наработки для вероятности *Р*.

Поведение индекса безопасности системы во времени эксплуатации подобно поведению функции элемента *β (t):* он обратен логарифму наработки; его предельное значение равно нулю, когда еще сохраняется допустимый уровень риска.

**Пример.**

Срок службы наконечников кислородных фурм для продувки конвертера обусловлен двумя повреждающими процессами: а) ростом сквозной трещины, что ведет к утечке охлаждающей воды; б) разгаром сопла, что снижает эффективность плавки.

По результатам анализа отказов (44 случая за год) апостериорно были получены фактические ФРД, которые измерялись числом плавок:

 (3.4)

Сообразно процедуре «дерева отказов» (рис. 3.1) при развитии повреждений ущерб от аварий, вследствие сквозных трещин был оценен в 256 плавок, а ущерб от разгара сопел в 54 плавки. Тогда относительная тяжесть ущерба составит *πс*=0,83, *πw*=0,17. Количество видов отказов распределились поровну *сс*=*сw*=0,5.

К началу эксплуатации фурмы с новым наконечником исходные индексы безопасности составляют *βс98*=1,69, *βw98*=2,52, что дает:



Заметим, что при *UΣ=Uw=*1 *βΣ98*=1.63, который меньше, чем частные *βс98* и *βw98*. Таким образом, с уровнем безопасности *R*=0,98 срок эксплуатации наконечников данной конструкции составляет 102,06=115 плавок.

Особенность подобных апостериорных моделей в том, что в отличие от априорных моделей, они не обладают свойством уточнения ресурса, когда безопасность поддерживается при эксплуатации.

Чтобы иметь такую возможность следует: а) получить модель долговечности вероятно-физическими методами, или, б) использовать иные диагностические признаки нежели наработка, например, расход охлаждающей воды и дутья.

Пожар

Разрушение конструкций конвертера

Взрыв конвертера

Выброс расплава

Прогар оболочки фурми

Разрыв кожуха

Снижение конкурентоспособности

Сокращение срока службы

Контакт фурмы со шлаком

Рост себестоимости стали

Повышение уровня металла

Увеличение расхода кислорода

Образование пенистого шлака

Деформация кожуха

Увеличение времени плавки

Износ футеровки

Изменение формы и размеров сопел фурмы

Рис. 3.1. Дерево возможного сценария развития аварийной ситуации

в конвертере

**Вывод**

Анализ методов оценки надежности сложной технической системы показал, что ее некорректно осуществлять по показателям надежности отдельных элементов или повреждающих процессов. Риск и безопасность механической системы возможно оценить по частным показателям риска ее элементов. Для этой цели предложена соответствующая методика, оперирующая как риском, так и индексом безопасности.

Стратегия технического обслуживания по его фактическому техническому состоянию с контролем надежности несостоятельна для уникального технологического оборудования. В ее развитие предложена стратегия технического обслуживания с контролем безопасности.

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

Надежность и безопасность эксплуатации технологического оборудования в значительной степени определяется нагруженностью его элементов. Достоверная информация о реальном процессе нагружения позволяет уточнить проектный срок службы, который был назначен без учета конкретных условий работы. Суть уточнения срока службы заключается в уменьшении вероятного рассеяния долговечностей. В конечном результате это дает основание увеличить гарантированный (безопасный) ресурс, а значит - и коэффициент использования оборудования.

Наиболее объективным методом определения нагрузок большинство специалистов считает непосредственные экспериментальные измерения. В аспекте оценки технического состояния оборудования этот метод хорош в ситуациях, когда имеется достаточно определенный элемент конструкции, отвечающий за всю ее безопасность. Обычно технологические машины горно-металлургического комплекса представляют сложные механические системы, включающие значительное количество потенциально опасных элементов и узлов. Производить сплошной непрерывный мониторинг их нагруженности проблематично. Поэтому целесообразно контролировать общую нагруженность механической системы, и уже по этой информации прогнозировать ресурс отдельных элементов конструкции.

Построение реально работающей системы мониторинга технического состояния технологического оборудования в инженерно-организационном отношении- трудоемкая задача. Она осложняется субъективными причинами мотивационного характера. Речь идет о том, что на ранних стадиях эксплуатации оборудования, когда оно имеет малую степень износа, необходимость обслуживания по техническому состоянию не ощущается. Надежность поддерживается планово-предупредительной системой ремонтов. Эта система становится малоэффективной на поздних стадиях эксплуатации, когда, с одной стороны, необходимо сдерживать возрастающие расходы на техническое обслуживание, связанные с преждевременной заменой не выработавших технический ресурс узлов, а с другой стороны, нужно застраховаться от аварий, что наиболее существенно сказывается на годовой производительности. Но чтобы на таких стадиях обоснованно оценивать технические состояния, необходимо знать историю эксплуатации от ее начала. Для этого подходит система мониторинга по естественным источникам информации.

Как показывает опыт, чтобы успешно функционировать, система диагностики должна решать и технологические задачи, например, способствовать увеличению производительности или показателей качества продукции.

Само по себе наличие автоматизированной системы контроля не дает эффекта в рассматриваемом аспекте, если не осуществить несколько этапов научного сопровождения.

1. Исследование связи показателей источников информации с показателями общей нагруженности машины или ее узла.
2. Формирование блока (процесса) нагружения объекта диагностирования.
3. Формирования блока (процесса) нагружения элементов машины или узла, определяющих безопасность эксплуатации и ресурс всего объекта.
4. Оценка сопротивления рассматриваемых структурных элементов сформированному блоку (процессу) нагружения.

После этого необходимо разработать кинетическую модель исчерпания ресурса, по которой можно непосредственно судить о техническом состоянии машины.

**4. Диагностические модели технического состояния оборудования**

**на основе накопления усталостных повреждений**

Для подавляющего большинства механических систем срок службы обусловлен временем сопротивления циклическим нагрузкам, при которых развиваются усталостные повреждения. Модели сопротивления усталости обычно используются при проектировании конструкций. На стадии эксплуатации для оценки показателей надежности (в том числе и долговечности) обычно применяют математико - статистические модели, основанные на функциях потока отказов. Такие модели для механических систем технологического оборудования ГМК (в большинстве своем уникального) получить сложно, из-за длительности срока эксплуатации. В то же время велик ущерб от возможных аварий, что и побуждает эксплуатационников производить предупредительную замену дорогостоящих узлов. Успешное решение проблемы видится в объединении методов технической диагностики и теории усталости металлов.

Деградационный процесс в виде усталости, практически, не контролируется прямыми диагностическими методами, следовательно, необходимо использовать косвенные признаки. Обычно в этом качестве применяется накопленное усталостное повреждение *D*, которое чаще всего определяется как сумма относительных долговечностей. Контроль процесса нагружения – важный этап диагностики, при котором косвенно можно оценить усталостное повреждение. В таком подходе оно выступает как диагностический параметр и долговечность можно определять по моделям старения, представленным в разделах 3 и 8 I-й части этого пособия.

В данном разделе разработан диагностический алгоритм оценки ТС на основе косвенного контроля усталостного повреждения, который позволяет увеличить степень выработки ресурса, сохраняя на требуемом уровне безопасность механических систем. Решается также задача оценивания возможности предложенного подхода для обслуживания по ТС, если использовать различные диагностические параметры (признаки).

Для контроля безопасности следует знать гарантированную долговечность *NR*, которая оценивается по линейной деградационной модели для интенсивности накопления повреждений , принимаемой за максимальное значение (линия *Dmax(t)*, рис. 4.1), а также по минимальному значению сопротивления усталости *[D]in*, учитывающему внутренние свойства механической системы.

Если характеристика *D* распределена нормально, то интенсивность *V* также асимптотически распределена по нормальному закону. Но распределение долговечности *N* значительно отличается от нормального, и плотность этого распределения можно представить в виде [14]:

, (4.1)

где и *SV* – среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) интенсивности *V*.

По данному распределению определяются среднее значение долговечности  и его СКО:

 или , (4.2)

где *SD*- СКО характеристики сопротивления механической системы *D* внешнему повреждающему процессу.

D

[D]in

βR1

[D]

NR



N ,число циклов

1

2

3

Dmax(t)

Dmin(t)



f(N)

f(D)

f(V)

Рис. 4.1. Схема перехода (стрелки 1, 2, 3) от модели постепенных отказов со случайными параметрами (плотности распределения f(N), f(D), f(V)) к детерминированной модели нагружения (), по которой с учетом ее вариации, отраженной в рассчитанном для безопасности R допускаемом повреждении [D], определяется гарантированная долговечность NR.

Для усталостных процессов сложно установить распределение величин *D* и *V.* В то время как распределение долговечностей хорошо аппроксимируется логарифмически нормальным или вейбулловским законами, поиск параметров которых в достаточной мере отработан специалистами. В такой ситуации более продуктивно решать обратную задачу: по функции распределения долговечностей находить допустимые значения параметра *D*, гарантирующие безопасную эксплуатацию. Тогда по медианным значениям параметров процесса нагружения следует получить функцию ** (вместо *Dmax(t)*), которую можно контролировать числом циклов наработки *nΣ*. Для этого допускаемую величину *[D]in* следует пересчитать с учетом внешнего фактора- вариации нагружения, получив величину *[D]*. В итоге деградационный процесс можно представить не как случайный, а как детерминированный (рис. 4.1), который отслеживается системами мониторинга. Зная с вероятностью *R* повреждение *[D]* путем контроля накопления повреждений прогнозируется гарантированная долговечность *NR*, которая используется для определения индекса безопасности *βR*.

**5. Диагностический алгоритм для оценки технического состояния при усталостном процессе**

При прогнозировании ресурса следует исходить из того, что процесс изменения напряжений в деталях машин не может быть стационарным в принципе, поскольку, как минимум, этому способствуют неровности взаимодействующих поверхностей. В результате из-за влияния многих факторов процесс нагружения является случайным. Такие процессы, описываемые корреляционной функцией или энергетическим спектром, недифференцируемы, в результате чего невозможен их структурный анализ и усложнен расчет на сопротивление усталости [14]. Дело в том, что хотя методологически случайный процесс относительно легко может быть смоделирован и воспроизведен посредством четырех параметров (матожидание нагрузки и ее СКО, эффективная частота и коэффициент широкополосности), но сложно получить и экспериментально подтвердить модель сопротивления усталости при вариации этих параметров. Поэтому необходима дополнительная обработка реального процесса, если речь идет об управлении безопасностью.

При чисто случайном нагружении периодичность плохо прослеживается, а это не характерно для технологического оборудования. Установившаяся ​​технология выполнения работ делает процесс нагружения псевдослучайным, а устоявшаяся частота приводов механизмов характеризует эксплуатационный процесс как периодически - случайный. Поэтому их можно схематизировать формализованными блоками, отражающими историю нагружения.

Нагруженность объектов металлургического оборудования представляется итоговым спектром, который формируется методом синтеза. Основа его состоит в нахождении технологической операции, при которой процесс нагружения будет эргодическим. Далее на основании статистических исследований повторяемости режимов (организационный фактор) определяется закон распределения нагрузок (рис. 5.1). Подобные итоговые спектры имеют высокий коэффициент вариации нагрузок (νQ≈ 0.5 и более), что не дает возможности уточнять расчет и повышать безопасность при эксплуатации. Высокий коэффициент вариации обусловлен многорежимностю эксплуатации. Вариация нагрузок по амплитуде в течение одного режима даже с учетом динамических явлений, как правило, составляет νQi = 0,05 ... 0,15. Незначительно меняется и частота нагружений [15].

Q

t

C1

C2

Ci

…







VQ1

VQ2

VQi

Q

C

C1

C2

Ci

…

VQ

…







а б

Рис. 5.1. Формирование спектра нагрузок (б) путем синтеза режимов нагружения *Q(t)* (а), которые наблюдаются при обработке машиной различных сортаментов металлопродукции, с повторяемостью *Ci* и средней нагрузкой .

Известны системы мониторинга, которые классифицируют результаты измерений нагрузок, объединяя их в спектры [15,16] и рассчитывая значение итогового коэффициента вариации νQ . Его изменение говорит либо об изменении вида работ (технологии), либо об изменении технического состояния (износе) оборудования. Таким образом, спектр нагрузок выступает в качестве диагностического признака, который имеет **эталонные** показатели, что дает возможность судить о ТС объекта. Невозможность определения **критических (предельных)** показателей спектра не дает шансов использовать его в качестве диагностического параметра при прогнозе ресурса. Для этой цели нет смысла обрабатывать временную реализацию нагрузок в виде спектра. Следует установить параметры такого первичного случайного процесса, который отражает естественную эксплуатационную нестационарность нагрузки. Под получаемую во время эксплуатации информацию о процессе нагружения *Q(t)* необходимо построить диагностический алгоритм, основанный на адекватных моделях сопротивления усталости.

Для этой цели пригодна модель ресурсного типа, где циклическая нагруженность характеризуется повреждающим действием, ведущим к накоплению повреждений, которые выступают в роли диагностического параметра. К моменту оценки ресурса *i* после *nΣi* числа циклов наработки степень исчерпания ресурса материала в конструкции, характеризуемая накопленным повреждением, составляет (рис. 5.2). величина , фактически, представляет долговечность при нестационарном нагружении, т.е. общее число циклов разного уровня, которое выдержал бы объект, если дальнейший режим нагружения будет происходить с прежней скоростью исчерпания ресурса *VDi* (рис. 5.2):

 (5.1)

где *λ*- число блоков нагружения, которые состоят из *j* ступеней,

*cj=nj/n0* – относительное число циклов нагружения *j*-ой ступени в общем числе циклов нагружения блока,

*dj*=*1*/*Nj* – элементарное (за один цикл) повреждение, являющееся обратной величиной к долговечности при стационарном нагружении *N*,

*аr* и *a0λ* – межблочное (устанавливается для всего процесса) и внутриблочное (устанавливается для блока, имеющего форму λ) повреждения, характеризующие интенсивность их накопления.

Математическое ожидание величины , будет:

 (5.2)

Для определения исходного или проектного ресурса  обычно принимают  (рис. 5.2), а нагружение представляется в виде спектра.

При диагностировании оборудования путем мониторинга нагруженности его узлов отслеживается фактор истории нагружения (характера чередования циклов, что влияет на интенсивность накопления повреждений). В результате этого, применительно к диагностическим алгоритмам и моделям сопротивления усталости появляются следующие возможности.

D

[D]i

[D]1

NnR1

NnRi

NnR2

[D]2

1

N

arctgVD1

arctgVD2

arctgVDi



nΣ1

nΣ2

nΣi

Рис.5.2. Интерпретация пошаговой переоценки ресурса по кинетике накопления усталостных повреждений (исчерпанию ресурса)

1. Идентифицируется деградационная модель - из широкого веера графиков накопления повреждений (рис. 5.1) выбирается конкретная реализация процесса. Данное положение из теории диагностики является основой индивидуального прогнозирования и позволяет повысить безопасность за счет уточнения ресурса.

2. Подобная идентификация связана с применением фактического режима нагружения, при котором конкретизируются величины внутри- и межблочного повреждений *a0* и *аr*, что позволяет повысить безопасность за счет более достоверной оценки ресурса. (Здесь мы не рассматриваем отклонения в определении ресурса, связанные с ошибками при оценке величин *dj* и *cj* на проектной стадии. В этом аспекте также имеется резерв повышения безопасности.)

На практике мониторинг работоспособности механических систем возможен двумя способами:

1) путем контроля (сполошного или периодического) процесса нагружения *Q(t),*

2) путем контроля процесса наработки *nΣ(t)* в числах циклов.

Таким образом, мы имеем два диагностических признака.

Первый способ более информативен, обеспечивает более достоверное прогнозирование, но требует наличия специальных встроенных измерительных систем. Второй способ этого не требует, но предполагает проведение исследований нагруженности, по результатам которых разрабатывается формализованный блок с вероятностными значениями параметров. Его использование возможно, практически, для любых механических систем. От применяемого способа (диагностического признака) зависит диагностический алгоритм оценки накопленного повреждения (диагностического параметра).

В его основе заложен закон суммирования повреждений. В данных моделях, как видно, используется корректированный закон линейного суммирования. Данный вопрос является весьма неоднозначным в теории сопротивления усталости и для применяемых моделей определяется формой схематизированного (или реального) блока. Следовательно, неоднозначно решается вопрос об объеме (числе циклов) блока нагружения. Форма блока, в первую очередь, определяется последовательностью технологических операций. Этот фактор из случайного может транформироваться в детерминированный, что сужает поле возможных реализаций деградационного процесса. Скажем, во время прокатки заготовки в элементах привода валков наблюдаются динамические колебания и возрастание крутящего момента при захвате металла. Затем наблюдается установившийся процесс с несущественным циклированием, после чего при выпуске металла вновь появляется колебательный процесс с повышенной амплитудой (рис. 5.2, а). Эти факты дают право сформировать типовую историю нагружения в виде трехступенчатого блока, отвечающего прокатке одной заготовки. Однако, вряд ли такой подход будет продуктивен, поскольку огромное число прокатываемых заготовок дает высокое перемешивание реализаций нагружения, при котором величины *a0* и *аr* стремятся к единице. Практика опровергает это положение. И если необходимо повысить степень выработки ресурса при эксплуатации, стоит отследить возможное отклонение величин *a0* и *аr* от единицы.

Считается, что фактор истории нагружения значим, когда итоговая долговечность *Nn* состоит из 10 - 20 блоков нагружений. Следовательно, объем блока определится делением на это число прогнозируемой долговечности *Nn*. Универсальным (хотя и несколько специфическим) средством разделения процесса нагружения на блоки являются перегрузки, сопровождающие нормальный процесс эксплуатации горно-металлургического оборудования. Их число зависит от их относительного уровня к штатным нагрузкам. Разработаны методики формализации таких историй нагружения [17, 18].

Впрочем, и при мониторинге процесса нагружения *Q(t),* как правило, следует оперировать блоком нагружения, чтобы установить фактические значения *a0* и *аr*. Обычно надежные характеристики сопротивления усталости (ХСУ) получают для стационарного нагружения, поэтому и возникает процедура суммирования повреждений, чтобы учесть фактор нестационарности. Если иметь базовые ХСУ, полученные при случайном нагружении, то в (1) будут иначе определяться элементарные повреждения *dj* , а повреждения *a0* и *аr* можно принимать за единицу. Однако, такие ХСУ получают на дорогостоящих сервогидравлических испытательных машинах, а разрабатываемые на их основе модели сопротивления усталости могут быть или громоздкими, или нечувствительными к отклонениям реального процесса нагружения от испытательного, при котором получены модели.

Предлагаемая ресурсная модель сопротивления усталости пригодна для обоих диагностических признаков.

Чтобы использовать детерминированную модель нагружения при мониторинге ТС, необходимо, как уже установлено, найти допускаемое повреждение *[D]* по гарантированной долговечности *NR*, рассчитанной с учетом внешнего и внутреннего факторов (рис. 5.3). Характеристики рассеяния долговечности при стационарном и нестационарном нагружении, обусловленные только внутренним фактором одинаковы и зависят от медианной величины . Известно также, что коэффициент вариации накопленного повреждения совпадает с коэффициентом вариации долговечности: *vD=vN*. Используя взаимосвязь между нормальным и логнормальным распределениями, получаем равенство СКО логарифмов повреждения и долговечностей:

 (5.3)

При этом величина *vN* определяется через коэффициенты вариации внутреннего *va* и внешнего *vy* факторов:

*vN *=.

lgD

βR1

lg[D]

lgNR



lgN

1

2

3



f(lgN)

fR(lgN)

Рис. 5.3. Нахождение допускаемого повреждения [D] по распределению долговечностей, заданному его плотностью f(lgN), для безопасности R

Внешняя составляющая разброса накопленного повреждения при диагностировании ТС определяется точностью регистрации процесса измерительными средствами, хотя при прогнозировании назначенного ресурса имеется особая методика расчета *vy* по принятому спектру [18]. Учитывая, что СКО величины , составляет  при мониторинге нагружения, когда величину *vy* не нужно прогнозировать, происходит отмеченное уточнение оценки ресурса.

Внутренняя составляющая разброса накопленного повреждения постоянна и связана с одной из основных ХСУ *SlgN*, члены уравнения которого *A, kSN, NA* определяются непосредственно при усталостных испытаниях или выбираются по рекомендациям из справочников для соответствующего материала и элемента конструкции:

 (5.4)

 (5.5)

Представив процесс накопления повреждений в двойных логарифмических координатах (рис. 5.3), получаем распределение величины *lgD* аналогичным распределению *lgN*:

 (5.6)

где *uR* – квантиль нормального распределения для вероятности *R.*

Установив требуемый уровень безопасности *R*, приравняв *DR=1* (тогда *lgDR=0),* получаем:

  (5.7)

Если задавать допустимый уровень риска, то перед вторым сомножителем следует ставить знак «+». В принятой позиции величина принимает смысл допустимого повреждения. При гарантированном уровне безопасности P=98%, принятом в общем машиностроении, полагая =1, допускаемая величина повреждения будет:

 (5.8)

Остаточное число циклов нагружения до прекращения эксплуатации детали на момент контроля *i* будет:

 (5.9)

Вынося за скобки значение числа циклов наработки *nΣi*, которое контролируется, окончательно имеем:



(5.10)

Здесь черта над символом текущих повреждений подчеркивает то, что оперировать следует серединными значениями.

Допускаемая величина  непостоянная и определяется усредненной скоростью исчерпания ресурса (, рис. 5.2). Для установившегося процесса величина постоянна. Однако, значения для разных моментов оценки ресурса после нараб отки *nΣi*будут разными и необходимо производить пересчет .

Точность данной оценки ресурса определяется величиной . Если для определения = применять общепринятые методики, базирующиеся на представлении нагружения в виде итогового спектра и корректировке повреждения, инвариантной к асимметрии цикла и характеру чередования нагрузок (истории нагружения), то прогнозируемый разброс долговечности  будет широк, что даст низкую оценку допускаемого повреждения. Для приведенного ниже в примере режима нагружения при безопасности *P*=98% допускаемое повреждение, рассчитанное таким методом, составляет = 0,25.

При применении для оценки ресурса на стадии эксплуатации методик, базирующихся на расширенных ХСУ, отражающих историю нагружения, величина =0,35…0,43, в зависимости от повреждаемости процесса.

Представив кинетику повреждений линейной моделью, из подобия треугольников OAB и OCE (рис.5.4) имеем пропорцию . Тогда в данных символах индекс безопасности определится через повреждения как:

.

Повреждение



[D]

[N]



C

B

A



DΣ

E

nΣ

0

Число циклов, время

Рис. 5.4. К определению индекса безопасности по накоплению

повреждений

Поскольку допускаемое повреждение имеет вероятностный смысл, так как оно подсчитано для безопасности *R,* то и ее индекс, найденный по данной формуле, также может трактоваться как *βR*. Также вероятностную трактовку имеет и степень выработки (исчерпания) ресурса: .

В разработанном диагностическом алгоритме предельная величина повреждения принята за единицу (как и весь безопасный ресурс). Тогда степень выработки ресурса принимает смысл и величину текущего повреждения *Di* в вероятностном аспекте:

. (5.11)

Изменение значений *βR* и *rR* происходит непрерывно за счет накопления повреждений *Di* (произвольная модель нагружения), *DΣ* (блочная модель нагружения) при эксплуатации, а также скачкообразно при пошаговой переоценке гарантированного ресурса и допускаемого повреждения *[D]*. Однако, подобные скачки на графике функции безопасности *βR(t)* отражаются, если вычислять индекс безопасности по теоретической зависимости, получаемой из его определения как логарифма гарантированного запаса долговечности (рис. 5.5).

При мониторинге процесса наработки индекс безопасности вычисляется через повреждения и график *βR(t)* имеет, как показывает практика, монотонно убывающий вид (рис. 5.5).

βR

βR0

βR1

βR2

βRi

nΣ1

nΣ2

nΣi

NnR0

NnR1

NnR2

log (числа циклов)

Рис. 5.5. Формирование графика изменения индекса безопасности при переоценке гарантированной долговечности NnR1, 2…i (тонкие линии), а также при мониторинге наработки nΣ1, 2…i (жирные линии) по накоплению усталостных повреждений

**5.1 Экспериментальная проверка диагностического алгоритма**

**при мониторинге процессов наработки и нагружения**

**элементов конструкций**

Рассмотрим для **примера** режим нагружения, формализованный двухступенчатыми блоками с относительными длительностями базовой ступени *сB*=0,99 и перегрузочной *сOL*=0,01. Распределение уровней цикловой повреждаемости ступеней, характеризующие их нагруженность, подчиняется нормальному закону (рис. 5.6, а):

 (5.12)

где *dB* и *dOL* - элементарные (за один цикл нагружения) повреждения,

соответственно, на базовой и перегрузочной ступени,

*RσB* и *RσOL* - коэффициент асимметрии цикла, соответственно, на базовой и

перегрузочной ступени,

*uр* - квантиль нормального распределения для вероятности P.

σ**/*МПа***

**0,10**

**300**

***1***



**P**

**d-1**

**105**

**140**

**200**

**104**

**3**

**5**

**106**

**7**

**0,01**

**0,90**

**0,99**

***б***

***а***

***1***

***2***

**0,50**



Рис. 5.6. Распределение нагрузок в повреждениях (а) и напряжениях (б) на нормальной вероятностной сетке (1) и его ступенчатая аппроксимация (2)

Такая модель нагружения отражает последовательность чередования ступеней (в частности, появление перегрузок), при которой можно учесть изменение (корректировку) величины *а0*. В данном примере межблочное повреждение *а0* определялось по полиномиальной модели. На рис. 5.6, б изображено более привычное частотное распределение этого процесса в эквивалентных симметричному циклу напряжениях. Для перехода от элементарных повреждений *dj* к напряжениям использовалась модель сопротивления усталости, приведенная в работе [19].

Совокупность воздействий двухступенчатыми блоками (5.12) за длительный период дает такой итоговый спектр. Ему соответствует стандартный блок объемом 20000 циклов на основе биномиального распределения с параметром *р=0,5* [20], для которого приведены амплитудные напряжения *σa* для симметричного цикла, и максимальные напряжения *σmax* для отнулевого цикла. Эквивалентирование этого блока (2, рис. 5.6, б, табл. 5.1) осуществлено по повреждающему действию, оцениваемому как *Σdj∙cj.*. Для обоих блоков (двухступенчатого и шестиступенчатого) этот параметр равен 2,25∙10-6.

Таблица 5.1

Параметры эквивалентного блока нагружения

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *j*  ступени | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *nj*, циклов | 6 | 54 | 400 | 1800 | 5600 | 12140 |
| *cj* | 0,0003 | 0,0027 | 0,02 | 0,09 | 0,28 | 0,607 |
| *dj-1* | 7500 | 19000 | 40000 | 160000 | 570000 | 1200000 |
| *σa*, МПа (*Rσ=-1)* | 320 | 250 | 230 | 190 | 160 | 145 |
| *σmax*, МПа (*Rσ=0)* | 390 | 300 | 260 | 225 | 200 | 190 |

Таблица 5.2

Показатели циклического нагружения блок-случайного процесса

(рандомизированная последовательность блоков)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № блока | σВ, МПа | σOL, МПа | RB | ROL |  |  |
| 1 | 215 | 270 | -0,44 | -0,42 | 330000 | 17900 |
| 2 | 175 | 277 | -0,74 | -0,22 | 400000 | 25100 |
| 3 | 190 | 265 | -0,48 | -0,58 | 325000 | 17150 |
| 4 | 195 | 262 | -0,39 | -0,17 | 470000 | 45000 |
| 5 | 196 | 245 | -0,22 | -1,0 | 626000 | 18950 |
| 6 | 184 | 190 | -0,29 | -0,61 | 523000 | 30600 |
| 7 | 175 | 269 | -0,50 | -0,29 | 582000 | 23800 |
| 8 | 175 | 238 | -0,60 | -0,63 | 530000 | 35400 |
| 9 | 177 | 260 | -0,39 | -0,33 | 970000 | 30000 |
| 10 | 172 | 250 | -0,52 | -0,48 | 610000 | 32300 |
| 11 | 215 | 270 | -0,44 | -0,42 | 330000 | 17900 |
| 12 | 175 | 277 | -0,74 | -0,22 | 400000 | 25100 |
| 13 | 190 | 265 | -0,48 | -0,58 | 325000 | 17150 |
| 14 | 195 | 262 | -0,39 | -0,17 | 470000 | 45000 |

Очевидно, должны бы быть одинаковыми результаты расчета гарантированного ресурса, допускаемого повреждения и функции безопасности для обоих моделей нагружения. Для проверки этого суждения были проведены усталостные испытания металлических образцов, для которых и была получена использованная модель ХСУ [19]. Режим блок-случайного нагружения образцов, получаемый методом Монте-Карло по модели (5.12), приведен в таблице 5.2. Предварительно для шестиступенчатого блока по методике Серенсена-Когаева была получена функция распределения долговечности, по которой найдена соответствующая функция индекса безопасности для *R=0,98* (, рис. 5.7).

В данном случае для нахождения уравнения индекса безопасности используется его формулировка как *βR=lgNnR -lgnΣ*. При моделировании нагружения в виде спектра для приведенных условий получаем: *lgNn98=4,14.*

Исходя из модельных представлений, разница между диагностированием с использованием контроля наработки *nΣ(t)* и с использованием конроля нагружения *Q(t)* заключается в наличии существенного коэффициента вариации внешнего фактора *vy* для первого случая, и в его, практическом, отсутствии во втором. Чтобы экспериментально подтвердить этот факт, нужно в первом случае при испытаниях для каждого образца реализовывать разные истории нагружения, состоящие из двухступенчатых блоков с разными параметрами (имитация мониторинга наработки); в другом случае следует для каждого образца реализовывать одну и ту же историю нагружения, но разной продолжительности, фактически, осуществляя программное нагружение макроблоком, состоящим из двухступенчатых микроблоков (имитация мониторинга нагружения). Именно такой макроблок из 10 микроблоков каждый объемом 10000 циклов представлен в таблице 5.2. По результатам испытаний были получены функции распределения долговечностей и определено ее гарантированное значение, определяющее положение функции безопасности: *lgNn98=4,85* (блок- случайное нагружение), *lgNn98=5,00* (блок- программное нагружение). Таким образом, учет фактора истории нагружения позволил примерно в 5 раз продлить безопасный ресурс (, рис. 5.7).

Идентификация деградационного усталостного процесса при диагностировании ТС механических систем технологического оборудования происходит по следующему алгоритму. При мониторинге процесса нагружения распознаются и измеряются циклы нагрузки, соответствующие ступеням формализованного блока. По ним определяются максимальные (амплитудные) напряжения (*σВ* и *σOL*, табл. 5.2) и асимметрии цикла, которым соответствуют элементарные повреждения в виде относительных долговечностей при стационарном нагружении. Кроме этого, регистрируется число циклов наработки. Если в формализованном блоке зафиксировано число циклов ступеней *cj* (в примере *cOL/cB=1/100)*, то достаточно контролировать общее число циклов наработки *nΣ*.

Для каждого блока по полиномиальной модели [19] определяются скорректированные значения внутриблочного повреждения *a0* (табл. 5.3), а также по (1) рассчитываются медианные значения итоговой долговечности, приняв *ar=0,7* (табл. 5.4). СКО логарифмов долговечностей *SlgN* определялось по зависимости (2), где *A=0,175, kSN,=0,075, NA=105*.

Таблица 5.3

Накопление повреждений при блок-случайном процессе

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № блока | *a0* | Dλ | DΣ | [D] | β98 |
| 1 | 1,06 | 0,034 | 0,034 | 0,440 | 1,11 |
| 2 | 0,80 | 0,036 | 0,07 | 0,448 | 0,81 |
| 3 | 0,79 | 0,046 | 0,116 | 0,460 | 0,60 |
| 4 | 1,12 | 0,02 | 0,136 | 0,420 | 0,49 |
| 5 | 0,65 | 0,033 | 0,169 | 0,443 | 0,42 |
| 6 | 0,87 | 0,026 | 0,195 | 0,430 | 0,34 |
| 7 | 0,79 | 0,027 | 0,222 | 0,433 | 0,29 |
| 8 | 0,66 | 0,033 | 0,255 | 0,442 | 0,24 |
| 9 | 0,76 | 0,018 | 0,273 | 0,413 | 0,18 |
| 10 | 0,66 | 0,03 | 0,303 | 0,437 | 0,16 |
| 11 | 1,06 | 0,034 | 0,357 | 0,440 | 0,12 |
| 12 | 0,80 | 0,036 | 0,373 | 0,448 | 0,08 |
| 13 | 0,79 | 0,046 | 0,419 | 0,460 | 0,04 |
| 14 | 1,12 | 0,02 | 0,439 | 0,420 | -0,02 |

Повреждение, вносимое каждым блоком нагружения, вычислялось как:

. (5.13)

Общее накопленное повреждение определяется как *DΣ=(ΣDλ)/ar*. Остальные параметры деградационного процесса (табл. 5.3, 5.4) находились по (5.1) - (5.10).

В процессе нагружения образцов контроль показателей ТС производился через каждый блок, то есть 14 раз. Диагностирование показывает, что ресурс материала вырабатывается к середине 14 блока (r98>1). На самом деле к этому сроку образцы еще не разрушались. Они входили в зону риска (рис. 5.7), где показатели ТС оцениваются по иным моделям. Реальная кинетика изменения индекса безопасности (, рис.5.7), в целом, отвечает теоретическому ходу функции *βR(t)* (графики ,  практически, параллельны). Это свидетельствует о равномерном уменьшении индекса безопасности за каждый блок, что подтверждает состоятельность этого показателя для оценки ТС. Сравнивая долговечности, при которых *β98*=*0*,можно констатировать, что идентификация деградационной модели дает возможность продлить срок эксплуатации в 2 раза по сравнению с диагностированием посредством контроля наработки, и в 10 раз по сравнению с исходным ресурсом.

Таблица 5.4

Ресурсные показатели при блок-случайном процессе нагружения

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № блока | SlgN |  | nrem98 | r98 |
| 1 | 0,199 | 208500 | 119870 | 0,077 |
| 2 | 0,197 | 195000 | 108205 | 0,156 |
| 3 | 0,189 | 152400 | 89000 | 0,252 |
| 4 | 0,215 | 336700 | 85000 | 0,32 |
| 5 | 0,200 | 215700 | 81580 | 0,38 |
| 6 | 0,208 | 274400 | 73300 | 0,45 |
| 7 | 0,206 | 260700 | 67250 | 0,51 |
| 8 | 0,200 | 214800 | 57900 | 0,58 |
| 9 | 0,220 | 393000 | 46360 | 0,66 |
| 10 | 0,203 | 239000 | 44900 | 0,69 |
| 11 | 0,199 | 208500 | 34700 | 0,76 |
| 12 | 0,197 | 195000 | 24600 | 0,83 |
| 13 | 0,189 | 152400 | 12857 | 0,91 |
| 14 | 0,215 | 336700 | 0 | 1,04 |



Рис. 5.7. Изменение индекса безопасности β98 в процессе наработки nΣ, полученное при моделировании нагружения итоговым спектром (β```98); при контроле наработки (β``98); при мониторинге нагружения (β`98), а также при этом кинетика исчерпания ресурса (r98).

**Выводы**

1. Для прогнозирования технического состояния (ТС) следует выбирать такие диагностические параметры, у которых можно установить их предельные значения, обусловленные природой деградационного процесса (прогнозирование работоспособности) или связанные с качеством выполняемых объектом операций (прогнозирование исправности). Диагностические параметры, у которых можно установить лишь эталонные показатели, пригодны только для оценки ТС. Например, форма временного сигнала нагружения главной линии прокатного стана дает информацию об изношенности сочленений и о качестве подготовки обрабатываемого металла. Но для прогнозирования срока службы деталей, определяющих безопасность механической системы, данный признак пригоден лишь как основа для оценки накопленного повреждения, отражающего деградационный усталостный процесс, происходящий в металле конструкции.

2. В качестве косвенных диагностических параметров для прогнозирования ТС механических систем технологического оборудования предлагаются индекс безопасности и степень выработки (исчерпания) ресурса, которые оцениваются по прямым диагностическим признакам- временным реализациям процесса нагружения *Q(t)* или прцесса наработки *nΣ(t)*. В первом случае возможно продлить безопасный ресурс в 10 раз, а во втором случае в 5 раз по сравнению с исходным ресурсом. Столь значительный эффект достигнут для элементов конструкций, рассчитанных на ограниченную долговечность. Для объектов, рассчитанных на длительный срок службы эффект от мониторинга ТС в относительном выражении будет меньше, хотя абсолютное время продления будет весьма немалым.

3. Мониторинг процесса нагружения более информативен по сравнению с отслеживанием числа циклов наработки, позволяя исключить фактор случайности в алгоритме оценки безопасности (межблочное повреждение *аr*) и за этот счет продлить срок безопасной эксплутации.

4. Переход от моделирования нагруженности механических систем технологического оборудования частотным распределением (итоговым спектром) к моделированию процесса нагружения формализованным блоком (типовой историей нагружения) со случайно изменяющимися параметрами позволяет использовать в качестве диагностического признака при прогнозировании работоспособности число циклов наработки. Это позволяет избежать оснащения оборудования сложными системами наблюдения за условиями эксплуатации, что актуально для действующих объектов.

1. **Повышение безопасности на основе деформационных моделей**

**сопротивления усталости**

В предыдущем разделе был представлен один из аспектов решения проблемы повышения безопасности, связанный с учетом влияния истории нагружения, когда реальный процесс представляется формализованными блоками со случайно изменяющимися параметрами.

Еще один эффективный путь решения рассматриваемой задачи связан с переходом от силовых критериев (СК) к деформационным критериям (ДК) сопротивления усталости. Будучи разработанным для моделирования процессов малоцикловой усталости, ДК были распространены на область многоцикловой усталости и в настоящее время являются основой единой методологии прогнозирования долговечности, применяемой западными специалистами .

Основное преимущество деформационных критериев заключается в более высокой достоверности расчета при нестационарном и случайном нагружении. Это связано со следующим:

* деформация материала как мера нагруженности связана с природой усталости теснее, чем напряжение;
* ДК ближе соответствует процедуре схематизации нагрузок, смысл которой заключается в регистрации замкнутых петель механического гистерезиса;
* нестабильность формы кривых деформирования при циклическом нагружении ведет к прогрессивному накоплению систематической ошибки при СК, а для ДК систематическая ошибка стабильна в широком диапазоне интенсивности нагружения.

Среди других преимуществ деформационных критериев следует отметить их:

* универсальность, т.е. устойчивость кривой усталости к влиянию таких факторов, как асимметрия цикла, размеры сечения;
* простоту и экономичность получения характеристик сопротивления усталости;
* хорошую сочетаемость с современными расчетами напряженно–деформированного состояния по МКЭ, при котором определяются истинные деформации элементов конструкций.

По ДК целесообразно рассчитывать элементы конструкций, находящихся в условиях неоднородного напряженного состояния и подвергающиеся в зонах локализации местным пластическим деформациям.

В инженерной практике возможность уточнения прогноза ресурса за счет применения деформационных критериев до сих пор не использовалась, хотя факт боле узкого рассеяния долговечностей при испытаниях образцов в жестком режиме нагружения (контроль деформаций) давно отмечен исследователями. Об этом свидетельствуют усталостные испытания образцов в условиях высоких концентратов напряжений, когда в вершине надреза наблюдается стеснение деформаций, режим нагружения приближается к жесткому и в итоге рассеяние долговечностей уменьшается [17].

Для деформационных критериев параметр , имеющий смысл величины при *lgNA=5*, можно принимать вдвое меньше , найденного для силовых критериев (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Отношение параметров базового уравнения (4.2)

|  |  |
| --- | --- |
| Материал |  |
| сталь 15Г2АФ | 2,13 |
| сталь45 | 2,17 |
| сталь1Х13 | 2,00 |
| сталь ЭП-310 Ш | 2,20 |
| бронза Бр АЖ9 | 1,14 |
| чугун СЧ21-40 | 2,00 |
| сплав ВТ 3-1 | 1,41 |
| сплав ВТ 3-1 | 1,34 |

Предполагая, что на уровне неограниченной долговечности характеристики сопротивления усталости для СК и ДК совпадают, окончательно получаем уравнение:

** (6.1)

устанавливающее взаимосвязь между параметрами рассеяния долговечностей при ДК и СК.

**6.1 Функции распределения долговечностей предохранительного**

**шпинделя**

Для оценки эффективности прогнозирования долговечности необходимо получить расчетные ФРД, после чего сравнить их с реальными ФРД элементов конструкций. Количество отказов таких элементов должно быть достаточным



Рис. 6.1 Виды разрушений предохранительных шпинделей ТПА-5-12”

для получения ФРД. Целесообразно выбирать детали, имеющие малый срок службы, к числу которых относятся разрушающиеся элементы предохранительных устройств.

Для иллюстративного **примера** выбран предохранительный шпиндель (ПШ) линии привода рабочих валков пильгерстана [17].

Он выполнен из стали 35Л (предел прочности σВ= 500 МПа, предел выносливости при кручении τ-1=104 МПа и имеет сплошное сечение ø350 мм, ослабленное канавкой с теоретическим коэффициентом концентрации напряжений ατ=2,38).

Характеристики сопротивления усталости для ПШ получены на основании проведенных испытаний образцов конструкционных углеродистых сталей на кручение в мягком и жестком режимах нагружения. С учетом полученных результатов и рекомендаций ГОСТа 25.504-82 для СК получено уравнение кривой усталости ПШ:



где τmax – максимальное номинально-упругое касательное напряжение цикла, МПа;

N – долговечность в циклах.

Элементы конструкций, работающие при неоднородном напряженном состоянии и подвергающиеся в зонах локализации пластическим деформациям, целесообразно рассчитывать по деформационным критериям. Проведенные испытания на усталость при кручении обосновали приемлемость для таких условий деформирования модели И. А. Биргера, которая для данного материала определена как:

 (6.2)

где *γa*– истинная сдвиговая амплитуда деформации цикла на дне канавки;

N – долговечность до предельного состояния.

Истинные деформации можно определить расчетным путем по номинальным характеристикам:

 (6.3)

где τн и γн – номинальные касательное напряжение и сдвиг;

- значение касательного напряжения по кривой

деформирования, соответствующее деформации ;

τк и γк – касательное напряжение и сдвиг, ограничивающие действие

закона Гука;

n- показатель упрочнения материала.

Для установившегося процесса деформирования τк=175 МПа и n=0,21.

Параметры уравнения (6.1) получены по результатам испытания образцов с механически необработанной поверхностью в мягком режиме и составляют Ас=0,22, tgαc=0,053, lgNA=5,34.

Базовая взаимосвязь среднеквадратичного отклонения логарифма долговечности  и его медианного значения получена путем испытания образцов нормализованной углеродистой стали с содержанием 0,3% С и для деформационных критериев имеет вид:

 (6.4)

Здесь уже учтены межплавочное рассеяние, вариация размеров канавки и увеличение размеров детали.

Процесс изменения крутящих моментов в приводе валков пильгерстана является узкополосным с эффективной частотой около 1 Гц и отнулевым коэффициентом асимметрии цикла [17]. В начальный период прокатки происходит затравка заготовки при котором моменты прокатки на 20 – 40% выше, чем в последующий установившийся период. Ко времени окончания прокатки трубы из-за остывания ее заднего конца моменты вновь возрастают. Коэффициент вариации моментов при прокатке одной заготовки составляет 7 – 10%.

Вероятность Р и величина перегрузочного момента *MП* могут быть оценены по распределению Райса, которое при Р < 10-3 может быть аппроксимировано нормальным распределением со средним значением крутящего момента:



и его среднеквадратичным отклонением 

где  и SM – медианное значение и среднеквадратичное отклонение

основных технологических крутящих моментов.

Таким образом, спектр нагружения элементов главной линии пильгерстана можно представить как композицию нормальных распределений с параметрами  и SM при Р > 10-3 и  и SП при Р < 10-3.

Итоговый коэффициент вариации спектра моментов за полугодичный период составил Vф= SM /= 0,27, а средний момент установившегося процесса прокатки составил =0,7 . Это ведет к появлению в канавке ПШ номинальных касательных максимальных напряжений цикла равных  чему соответствуют истинные деформации сдвига  По (6.4) определяется повреждающий параметр основной ступени 

Для определения долговечности ПШ непрерывное распределение максимумов заменяется ступенчатой линейной аппроксимацией с величиной моментов Мi и относительной длительностью их действия Сi (табл. 6.2). В дальнейшем ступенчатый блок моментов необходимо преобразовать в блок напряжений (для СК) или деформаций (для ДК). Поскольку расчет при СК ведется в номинальных напряжениях, их блок подобен блоку моментов.

Спектр деформаций, возникающих в канавке ПШ, ощутимо шире спектра напряжений. Его параметры определяются способом последовательных вычислений коэффициентов вариации случайных величин, входящих в зависимость (3.6). Коэффициент вариации основного и перегрузочного спектра деформаций увеличиваются, соответственно, в 1,7 и в 2,3 раза.

Математическое ожидание итоговой долговечности no несложно определяется на основании линейного суммирования повреждений по долговечностям N(τ)i, N(γ)i и величине Сi.

Таблица 6.2

К расчету долговечности ПШ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Сi | С=0,999 | | | | | | | СП=0,001 |
| 0,0045 | 0,0275 | 0,083 | 0,256 | 0,258 | 0,256 | 0,115 |
|  | 3 | 2,25 | 1,5 | 0,75 | 0 | -0,75 | -1,5 |  |
| τi, МПа | 149 | 133 | 116 | 100 | 83 | 67 | 50 | 189 |
| N(τ)i | 7,3∙103 | 1,6∙104 | 4,4∙104 | 1,3∙105 | 4,8∙105 | 2,2∙106 | 1,8∙107 | 6∙103 |
| γi∙103 | 5,87 | 4,96 | 4,00 | 3,27 | 2,48 | - | - | 8,75 |
| N(γ)i | 2∙104 | 4,5∙104 | 1,1∙105 | 5∙105 | 4∙106 | - | - | 4,8∙103 |

Перегрузки в линии привода обычно происходят в начальный момент прокатки, вследствие несинхронности действий подающего аппарата и валков. Параметры итогового спектра основных нагрузок действуют до значений пик-фактора . Поэтому можно установить соотношение числа циклов перегрузочной и основной ступени . В общем, этот вопрос на стадии проектирования не ясен. Использование кривой усталости для деформаций, которая в области больших  имеет более крутой наклон, делает итоговую долговечность  мало чувствительной к относительной длительности перегрузки. Тогда величина не имеет решающего значения. Установив вероятность  получаем коэффициент вариации перегрузок *Vn*=0,04 и среднее значение [17].

При переходе от спектра в напряжениях к спектру в деформациях, вследствие расширения их диапазона в упругопластическую область наблюдается увеличение коэффициента вариации перегрузок до *Vn*=0,09. Тогда  и 

Многорежимное нагружение представляется в виде нескольких подобных по форме микроблоков *λ*, имеющих различные частости  и повреждающие действия ступеней  (табл. 6.3).

Параметры рассеяния ступеней могут быть заданы различными способами. В данном случае коэффициенты вариации *Vфλ* вычислены из предположения равенства СКО нагрузок основных ступеней блоков  при сохранении итогового коэффициента вариации *Vф*=0,27. Вариацией величины  пренебрегаем.

Таблица 6.3

Схематизация эксплуатационного нагружения ПШ пильгерстана

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *λ* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| *Cλ* | 0,0045 | 0,0275 | 0,083 | 0,256 | 0,258 | 0,256 | 0,115 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| Vфλ | 0,16 | 0,24 | 0,30 | 0,38 | 0,55 |  |  |
|  | 4,08 | 4,38 | 4,95 | 5,34 | 6,63 | 6,80 | 6,95 |
|  | 0,06 | 0,12 | 0,31 | 0,25 | 0,44 |  |  |

Рис. 6.2 ФРД при многорежимном нагружении (параметры кривых



соответствуют табл. 6.4)

Экспериментальные ФРД (5, 6, табл. 6.4) получены по фактическим срокам службы ПШ двух пильгерстанов, установленных параллельно. Распределение долговечностей ПШ, разрушенных вследствие усталости (обслуживающий персонал фиксирует перегрузку по току двигателя и разрушенные при этом ПШ не вошли в выборки), соответствует логнормальному закону. Сопоставление выборки долговечностей ПШ, полученных за три месяца и за шесть месяцев (включая первые три), демонстрирует тенденцию расширения рассеяния сроков службы (рост ),снижения их медианного значения (уменьшение ) по мере продления срока наблюдений. Это свидетельствует об отмеченном росте коэффициента вариации нагрузок и связанным с этим увеличением эквивалентной нагрузки.

С этой точки зрения результаты прогнозирования методом статистического моделирования (1, табл. 6.4) следует признать вполне удовлетворительным, поскольку модель нагружения включает варианты режимов за неопределенный срок.

Таблица 6.4

Параметры ФРД предохранительного шпинделя

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид моделирования процесса | Стадия прогнозирования |  | *Sу* | *Sа* |  |
| 1 | Многорежимный, двухступенчатый блок | Проектирование | 5,52 | - | - | 0,54 |
| 2 | Многорежимный, спектр | Проектирование | 5,32 | - | - | 0,35 |
| 3 | Двухступенчатый блок с широкой вариацией ступеней | Проектирование | 5,50 | 0,48 | 0,14 | 0,50 |
| 4 | Двухступенчатый блок с узкой вариацией  ступеней | Проектирование | 6,0 | 0,25 | 0,23 | 0,34 |
| 5 | Реальный | Эксплуатация (6 мес.) | 5,70 | - | - | 0,39 |
| 6 | Реальный | Эксплуатация (3 мес.) | 5,85 | - | - | 0,31 |

При представлении нагружения традиционным спектром из 14 ступеней (табл. 6.3) ФРД, определенная методом линеаризации [17] при условии линейного суммирования повреждений, имеет заниженные параметры (2, табл. 6.4). Можно сделать вывод, что невозможность учета истории нагружения при использовании частотного распределения снижает достоверность расчета, что в данном случае идет в запас долговечности. При проектировании эти особенности ведут к некоторому утяжелению конструкции, а также к необоснованному увеличению гарантированного срока службы, что снижает надежность оборудования.

Если не принимать во внимание факторы нестационарности и истории нагружения, а производить линейное суммирование, то значение будет уменьшено в 2,5 – 4,5 раза. В тоже время, если учитывать только фактор нестационарности, расчетное значение , наоборот, увеличивается относительно экспериментального [17]. Данная величина состоит из двух слагаемых, которые отражают влияние внешнего и внутреннего факторов (соответственно, *Sу* и *Sа*, табл. 6.4): 

Если промоделировать многорежимное нагружение двухступенчатым блоком с широкой вариацией ступеней (*Vф*=0,27) и оценить ФРД методом линеаризации, то ее параметры (3, табл. 6.4) оказываются близкими к параметрам ФРД, полученной статистическим моделированием. Снижение вариации ступеней до уровня, наблюдаемого при прокатывании заготовок одного типоразмера (*Vф*=0,07) ведет к увеличению долговечности ПШ и снижению величины почти в два раза (4, табл. 6.4). Это происходит из-за уменьшения рассеяния от внешнего фактора.

Следует обратить внимание, что все ФРД, фигурировавшие в сравнительном анализе, получены на основе деформационных критериев усталости. В целом, они обеспечивают более удовлетворительную эффективность прогнозирования, поскольку дают более высокую корреляцию кривой усталости и инвариантны к влиянию ряда факторов. Расчет ПШ по силовым критериям дает расхождение по достоверности в 5 – 10 раз, а по точности до 3,5 раз [17].

Использование логнормального закона для выравнивания распределения долговечностей элементов конструкций, испытывающих высокие уровни нагружения, остается возможным для различных режимов. Вопрос о законе распределения долговечностей актуален на стадии проектирования, когда приходится допускать широкое варьирование режимов. Если на стадии эксплуатации организовать сбор информации о нагруженности объекта, то логнормальность ФРД правомерна, ее параметры необходимы для прогнозирования остаточного ресурса.

**7. Прогнозирование технического состояния кожухов доменных**

**печей по уровню безопасности**

Кожуха доменных печей являются объектом повышенных затрат на механическое обслуживание и ремонт ввиду тяжелых условий эксплуатации, сложности и ответственности конструкции.

Во времена ритмичной работы и планового производства (70-80 годы) простой доменных печей вследствие разрывов, трещин и продувов кожухов в среднем по металлургическим предприятиям составлял 20% от их общего числа. В дальнейшем в условиях неритмичного производства (80-90 годы) ситуация усугубилась и, например, на комбинате «Криворожсталь» простои доменных печей (ДП) из-за отказов кожуха достигали 41%, из которых 52% приходится на область шахты.

**7.1 Стойкость и диагностирование кожухов**

Вопросы стойкости кожухов доменных печей (ДП) всегда находились в зоне особого внимания доменщиков, механиков и строителей промышленных сооружений. Со второй половины 20 ст. активно велись работы по совершенствованию конструкций стенок и холодильников домен, а также по подбору оптимальных марок стали и толщины их кожуха. При этом изучался характер напряженно-деформированного состояния элементов кожуха в условиях совместной работы системы кладка- компенсационный слой- кожух при воздействии на них внутреннего давления и температуры [21]. Предполагалось, что благодаря прогрессивным техническим решениям и обеспечению при расчете достаточного запаса статической прочности, возможна надежная и безаварийная работа ДП.

В виду того, что стенка ДП является сложной технической системой, на функционирование которой влияют множество факторов, ее работоспособность плохо прогнозируема на длительный период. Стал очевидным вывод о том, что достаточная надежность конструкции, закладываемая при проектировании, не может быть реализована при эксплуатации без соответствующей поддержки [21]. В связи с этим кожуха ДП, в сущности, принято обслуживать не по планово-предупредительной системе, а по фактическому техническому состоянию, для определения которого имеется соответствующая «Методика…» [22]. Подобная система обслуживания нуждается в применении методов технической диагностики. В связи с этим, с 70-х годов XXст. в доменном производстве интенсифицируется процесс внедрения систем технического диагностирования, которые позволяют контролировать конструкционно- эксплуатационые факторы. Такие системы оказывают позитивное влияние на стойкость кожухов. Так, в «Методике..» указано, что высокий ресурс кожухов ДП в США (44 года против 16 лет в России) связан с действием компьютерных систем контроля кожуха. Об этом также могут свидетельствовать разработанные в 2006 году мероприятия по продлению на 12 последующих лет эксплуатации кожуха ДП №5 «Северстали» после 20 лет его службы. Одна из предпосылок для такого акта, имеющего мировой приоритет [23], обусловлена действием в доменном цехе системы диагностики охлаждения печи на основе программного комплекса SCADA TRACE. Таким образом, персонал имеет опыт принятия решений по результатам диагностирования и подготовлен к стратегии обслуживания по техническому состоянию.

Современный доменный комплекс состоит из высокоавтоматизированных агрегатов, где в составе АСУ ТП может быть организована подсистема диагностики оборудования. Применяются системы для контроля за толщиной футеровки (существенное влияние на стойкость кожуха оказывает состояние футеровки и системы охлаждения, так как при отказе холодильника с дальнейшим локальным перегревом участка кожуха в нем, независимо от применяемой марки стали, развиваются пластические деформации); для контроля состояния кожуха используются стационарные системы с датчиками в виде тензорезистров и термопар, фиксирующими деформацию и температуру, а так же с акустическими резонансными датчиками, фиксирующими изменение акустической эмиссии при зарождении трещин. Такие средства позволяют получать первичную информацию, которую необходимо переработать для прогнозирования поведения конструкции. Указанная переработка осуществляется при помощи математических моделей, которые должны быть максимально эффективными. Под этим подразумевается возможность получения. Как можно большего числа показателей по минимуму исходной информации, а так же достоверность, точность и заблаговременность прогнозируемого ресурса.

Безусловно, только наличие средств технического диагностирования автоматически не приводит к увеличению ресурса. В той же «Методике…» приведен средний срок службы кожухов ДП Японии, составляющий 17 лет, хотя известно, что они хорошо оснащены диагностическими системами. На упомянутом комплексе ДП №5 после частичной реконструкции кожуха (в основном купольной части) в 2008 и 2011 годах произошли две аварии, связанные с раскрытием кожухов. На предприятиях необходимо отрабатывать программу ремонтных воздействий по результатам диагностирования. В их качестве должны выступать не только фактические значения диагностических параметров, но и прогнозные значения остаточных ресурсов. При этом необходим индивидуальный подход не только к каждой ДП, но и к каждому элементу кожуха [23].

В настоящее время на большинстве металлургических предприятий диагностирование ведется путем сопоставления рекомендованных и фактических значений диагностических параметров (признаков). К их числу (в зависимости от автоматизированности ДП) относятся температура кожуха в различных точках, разность температур хладагента на входе и выходе и его расход, температура и толщина кладки . Таким образом, производится поиск неисправностей и распознавание исправных состояний (1 и 2 задача диагностики).

Зачастую диагностический контроль выявляет отклонения фактических параметров от рекомендованных, установившихся при штатной технологии. Нет возможности и смысла в немедленном устранении подобных отклонений, поскольку практика показывает удовлетворительную дальнейшую работу. Персонал в таких случаях констатирует, например, «ограниченную работоспособность» системы охлаждения, хотя полученная информация пригодна для прогнозирования технического состояния (3 задача технической диагностики). Решение именно этой задачи оказывает ощутимое влияние на ресурс кожухов.

Широко известны методы *качественного* прогнозирования, вытекающие из дерева отказов (сценариев аварий). Его ствол выглядит следующим образом: выгорание (износ) футеровки→ отказ холодильника→трещинообразование (выпучивание) участка кожуха→ разрыв кожуха (разгерметизация печи) [23]. По времени каждый последующий этап оказывается короче предыдущего. К сожалению, отсутствие научно обоснованных предельных значений диагностических параметров затрудняет в реальных ситуациях количественно определять остаточный ресурс кожуха. Диагностирование не доведено до уровня технологии. В отсутствие обоснованных *количественных* прогнозов особое значение приобретает опыт персонала. Дисциплинированное соблюдение регламента техобслуживания должно подкрепляться грамотными решениями относительно сроков и видов ремонта. В этом плане негативную роль играет некоторый «образовательный диссонанс». Он выражается в том, что обучение проектированию несущих конструкций ДП осуществляется в ВУЗах строительного профиля, а ремонтно-техническое обслуживание производится специалистами-механиками, в учебных программах которых отсутствуют разделы, посвященные данной проблеме.

В настоящем разделе рассмотрен комплексный показатель ТС кожуха ДП, пригодный для *количественного* прогнозирования его работоспособности.

**7.2 Модели для оценки несущей способности кожуха**

Низкая надежность кожухов шахт ДП отчасти связана с методами их проектирования, при которых основной акцент ставился на оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) и выборе марок стали для изготовления конструкции. Расчет НДС производиться методами теории оболочек, представляя стенки ДП в виде многослойного усеченного конуса или цилиндра, испытывающее воздействие внутреннего давления и температуры. Величины рассчитанных напряжений зависят от множества факторов и физических величин. Поэтому диапазон возможных кольцевых и меридиональных напряжений весьма широк. Подобный подход в детерминированной статической постановке малоэффективен для прогнозирования работы конструкций.

В указанном аспекте для обоснования несущей способности кожуха ДП принята модель, традиционно используемая для металлоконструкций: проверяется возможность разрушения от однократного нагружения путем сравнения эквивалентных (по соответствующей гипотезе прочности) напряжений с расчетным сопротивлением для конкретной марки стали. Действующие напряжения вычисляются при максимальных параметрах доменного процесса. Учитываются также нештатные ситуации, такие как обрыв шихты после ее подвисания, подрыв настыли. Это приводит, соответственно, к колебаниям кожуха и коэффициенту динамичности в пределах от 2 до 3, а также к локальному 2-х- 4-х –кратному превышению напряжений [24]. Подобный статический поход для кожухов металлургических агрегатов является условным, поскольку потеря их работоспособности связана с иными процесами.

При этом также оказывается увеличенной толщина кожуха (до 100 мм для крупных ДП), что ведет к увеличению его жесткости, снижению деформируемости трубопроводных систем при их нагреве, расстройству узлов сопряжений элементов доменного комплекса. В связи с этим для крупных ДП рекомендовано применять высокопрочные легированные стали с карбонитритным упрочнением, обеспечивающим по нормативным рассчетам толщину кожуха 30-60 мм, что считается приемлемым. С внедрением высокопрочных сталей, имеющих повышенный предел выносливости, предполагалась экономия металла для изготовления конструкций доменного комплекса. Однако в полной мере это не произошло, поскольку эффективность от снижения материалоемкости, достигнутая при изготовлении, уменьшалась при эксплуатации в результате ненадежности кожуха.

Реально материал кожуха, пребывая в сложном напряженном состоянии, подвергается циклическим деформациям. К этому приводят технологические нужды: именение режимов плавки, выпуски чугуна, если они сопровождаются падением давления и т.п. Происходят колебания величины внутреннего давления и температуры. Вклад температуры в напряженное состояние кожуха более весомый, потому цикличность также связана с изменением состояния футеровки и системы охлаждения. В материале кожуха накапливаются усталостные повреждения, приводящие к появлению и развитию трещин. Считается, что кожух работает в области малоцикловой усталости [24, 25]. Это справедливо, если отталкиваться от среднесуточной частоты циклосмен напряжений, равной 5-6 цикл./сут., которая обусловливает требуемую долговечность в 2∙104…5∙104 циклов за кампанию печи в 12-30 лет. Критерии малоцикловой усталости позволяют установить долговечность кожуха до появления трещины величиной 1-2 мм. Для кожуха ДП среднего объема из стали В ст.3сп в местах концентрации напряжений (с их коэффициентом 2,5…3,5) при стационарных напряжениях на уровне расчетных сопротивлений, изменяющихся с довольно высокой асимметрией цикла (ее коэффициент 0,82), долговечность составила 8∙104 циклов. При сравнительно ритмичном производственном процессе, создающем частоту нагружений *f =2цикл./сут.*, это составляет 12 лет [25]. Такой же результат ( при иных параметрах нагружения) получен для кожуха ДП объемом 2700 м3 [24]. Интенсификация доменного процесса в современных условиях сопровождается, как правило, ростом частоты циклосмен и размахов напряжений, в результате чего требуемая долговечность, прогнозируемая по данным критериям, может быть не обеспечена.

С конца ХХ ст. для расчетной оценки несущей способности кожухов ДП начали использовать модели трещиностойкости. Они позволяют застраховать кожух от хрупкого разрушения при наличии в нем дефектов. Наиболее обоснована модель разрушения на основе энергетических критериев [26]. Она учитывает жесткость напряженно-деформированного состояния и пригодна для любых марок сталей. Однако, в ней рассматривается случай однократного нагружения, оставляя открытым вопрос о спектре действующих нагрузок, что не дает возможности оценить надежность. Кроме этого, вывод о работоспособности кожуха осуществляется при сравнении действующей температуры и критической температуры вязко-хрупкого перехода, что не вполне обычно для конструкций, подвергающихся циклическому нагружению. Расчеты живучести кожухов в детерминированном аспекте показали, что этот период, по меньшей мере, занимает 30% от долговечности до появления трещины [24].

Использование широко распространенных моделей линейной механики разрушения для определения критических размеров трещин [24] пригодны в основном для кожухов, изготовленных из стали В ст. 3 сп. Кожуха из сталей других марок, которые являются высокотрещиностойкими, нуждаются в моделях нелинейной механики разрушения, поскольку при этом перед вершиной трещины образуется пластическая зона значительных размеров.

Первые расчеты надежности кожухов выполнены в прочностной постановке на момент начала эксплуатации [24]. Вид функции надежности (ее изменение при эксплуатации) для кожухов ДП не исследован.

Для оценки текущего состояния кожуха разработан метод микропроб, при котором устанавливается степень деградации материала [22, 23] при этом прогнозирование технического состояния собственно конструкции невозможно.

**7.3 Определение индекса безопасности по функции распределения**

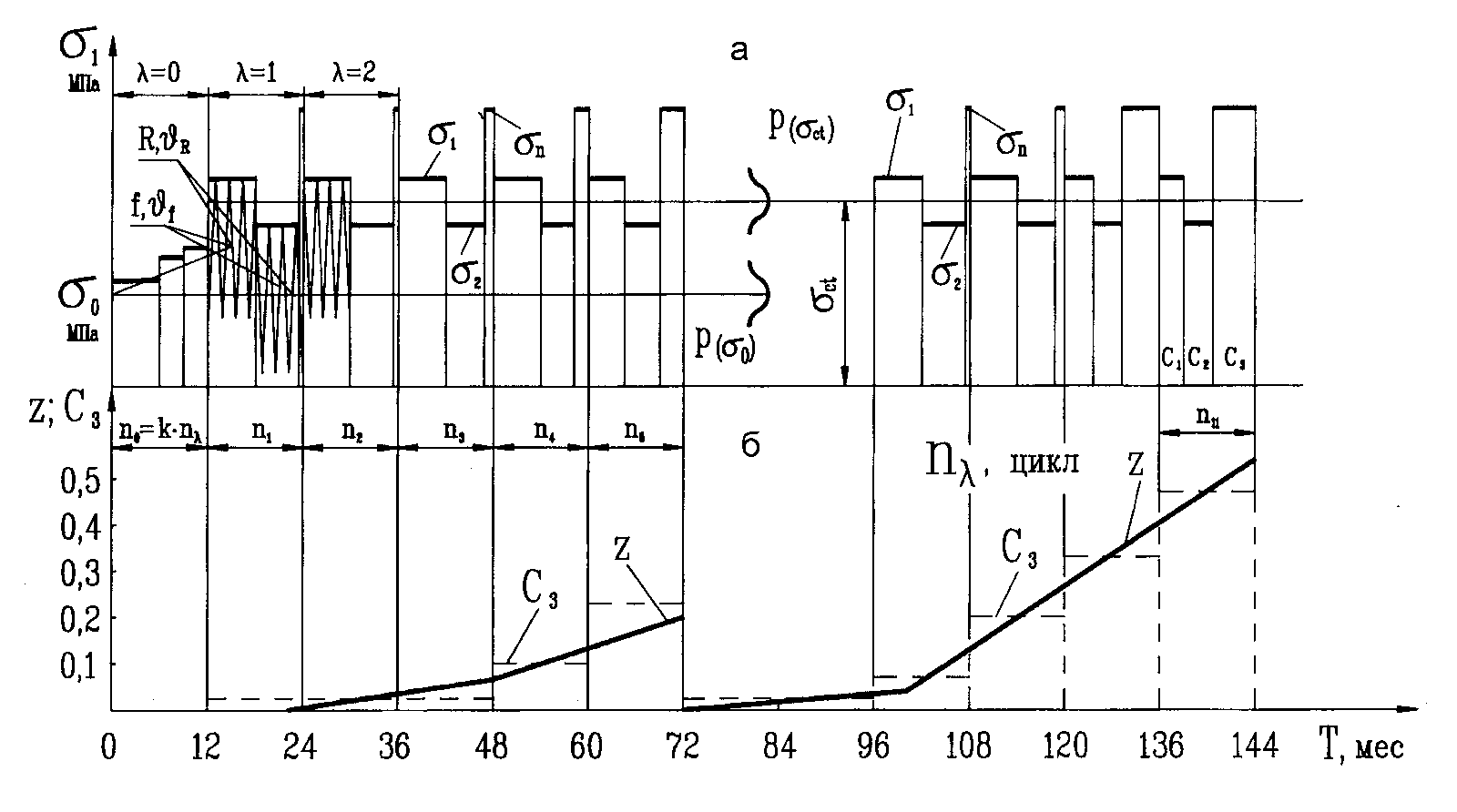
**долговечностей**

ДП является объектом повышенной опасности, в котором отказы элементов кожуха сопряжены со значительным последующим ущербом. Например, ремонт кожуха ДП объемом 1386 м3 после появления вертикальной трещины от лещади до фурменной зоны привел к простою печи в 195,3 часа и потерям чугуна в 10968 тонн. Потери в денежном выражении составили 395,4 тыс. грн. (без стоимости ликвидации аварии, в ценах 2002 года). Учитывая это, оценку технического состояния уместно производить посредством контроля уровня безопасности [6]. При такой стратегии обслуживания в качестве индикатора технического состояния используется индекс безопасности *βR*, представляющий собой логарифм гарантированного с уровнем безопасности *R* запаса долговечности. Поддержание безопасности при эксплуатации осуществляется, как ремонтными воздействиями, так и периодической переоценкой остаточных ресурсов при идентификации моделей нагружения и свойств материала кожуха во время его контроля.

Получить полную картину процесса нагружения элементов кожуха достаточно сложно, так как, практически, регистрация непрерывно не ведется, частота циклосмен малая. Обычно фиксируется максимальное напряжение цикла. Поэтому для формирования прогнозных режимов необходимо привлекать косвенные сведения, также как количество простоев, тихих ходов и т.п.

Индекс безопасности *βR* определяется в ресурсной постановке путем сравнения функций распределения долговечности и наработки. Для их поиска была сформирована типовая последовательность нагрузок (история нагружения) кожуха шахты ДП, представляющая блок из трех псевдослучайных процессов, имеющих одинаковую частоту *f*, но разные и взаимозависимые параметры цикла напряжений (как кольцевых, так и меридиональных). Все указанные характеристики задаются в вероятностном аспекте. Число циклов нагружений каждого процесса *i*  определяется относительным объемом его действия *ciλ* (λ – год эксплуатации). Повреждение оказывает обычно процесс, происходящий в зонах с неисправными элементами охлаждения, характеризующийся величиной *c3λ*. Особенность ее определения состоит в том, что она учитывает не только относительную длительность работы ДП с поврежденными холодильниками *t3λ*, но и относительную площадь кожуха *z3λ*, подверженному этому процессу: [21].

Преимущество типовой последовательности нагрузок в том, что установив параметры напряженности кожуха в определенном месте шахты в конкретные периоды работы ДП и состояния футеровки с холодильниками, можно реконструировать всю историю нагружения. Такая история для кожуха шахты ДП была разработана в результате значительного количества экспериментальных и теоретических исследований напряженного состояния кожуха, связанных с интенсивным освоением с 80-х годов ХХ ст. шахт, собранных из крупногабаритных охлаждаемых модулей (панелей) (рис. 7.2) [21].

Рис. 7.1 Схематизация процесса нагружения (а) и определение параметра  по потоку отказов  (б)

Имея неоспоримые преимущества в монтаже, такая шахта хорошо работает в условиях цинкосодержащего сырья, но при этом требуется особое внимание уделять гарнисажеобразованию. В Украине, России, Китае было построено около 20 ДП с шахтами из крупногабаритных модулей. Обслуживающий персонал оценил высокую ремонтопригодность системы охлаждения, поскольку выход из строя труб для хладагента легко устраняется наружной перемычкой, при этом ухудшается охлаждение малой площади кожуха. В результате величина *c3λ* меньше, чем у шахт ДП традиционной формы.

В практике обслуживания кожухов встречается ситуация, когда обнаружена трещина и следует определить время ее роста до критической величины. Для этого был разработан алгоритм поиска функции распределения живучести, основанный на деформационных критериях нелинейной механики разрушения и на моделях накопления повреждений [27].

Этот алгоритм был применен при обосновании выбора стали для крупногабаритных модулей [21]. Собранная из подобных панелей ДП №11 Днепровского металлургического комбината прослужила 20 лет вместо запланированных 12, что говорит о жизнеспособности проектных решений. За время эксплуатации было 3 плановых ремонта по замене листов кожуха, проведенные после 10 лет работы. Серьезные проблемы с конструкцией ДП начались на 16 году службы, когда ее обследовала министерская комиссия и, фактически, продлила ее эксплуатацию, ограничив цикличность воздействия на металл кожуха путем исключения работы на «тихом ходу».

Имея параметры функции распределения живучести при наличии горизонтальных поверхностных трещин начальной глубиной *l0*=10 мм (это 25% от толщины кожуха шахты *δ*=40 мм) [21], несложно получить функцию безопасности *β(t)* на этот период эксплуатации. Из определения индекса безопасности, его изменение во времени будет выглядеть таким образом:

 (7.1)

где *t* – время наработки кожуха в месяцах;

*f*=152 цикл./мес. – количество циклосмен напряжений в месяц [21];

*uR* – квантиль нормального распределения для вероятности *R*;

*vf*=0.33 – коэффициент вариации частоты циклосмен [21].

Индекс безопасности на момент появления трещин  определяется по функции распределения живучести, когда трещина растет в глубину до критического значения *lc*, которое зависит от марки стали (табл. 7.1). Величина *lc* вычисляется с учетом максимальных напряжений в период действия процесса *c3λ*.

Таблица 7.1

Показатели технического состояния кожуха шахты ДП на стадии живучести

в случаях изготовления его из различных марок сталей

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Марка стали | цикл. | цикл. |  |  | мес. |
| 1 | В ст. 3 сп | 4,30 | 0,42 | 0,55 | 3,45 | 11,2 |
| 2 | 09Г2С | 4,35 | 0,49 | 0,68 | 3,37 | 9,3 |
| 3 | 16Г2АФ | 4,66 | 0,41 | 0,80 | 3,84 | 27,4 |

Тогда: 

где *n0* и *Slgn0* –соответственно, среднее число циклов роста трещины и среднеквадратическое отклонение его логарифма.



Рис. 7.2 Фрагмент стенки шахты ДП №11 ДМК

В данном случае функция *βR(t)* характеризует безопасность всего кожуха шахты в предположении появления поверхностных трещин в окрестности отверстия под каждой поврежденной трубой охлаждения. Кроме этого, параметры истории нагружения имеют широкую вариацию, охватывая все сечения шахты по высоте. Таким образом, величина *βR(t)* имеет смысл характеристики безопасности системы элементов. После идентификации трещины по ее форме, размерам и расположению следует более конкретно установить параметры процесса нагружения поврежденного элемента кожуха. Благодаря этому переоценивается остаточный ресурс, индекс безопасности становится частной характеристикой элемента системы, а риск эксплуатации кожуха определяется по принципу слабого звена.

Наработка для уровня безопасности *R=0,98* в календарных месяцах будет соответствовать равенству *β98(t)=0* и представляет собой период живучести:

 (7.2)

Данное уравнение устанавливает взаимосвязь между основными прогнозными характеристиками диагностирования. Для его оценки на ранних стадиях эксплуатации (до появления трещин) используется указанный алгоритм, только вместо функции распределения живучести используется функция распределения долговечности.

**Выводы**

Наряду с оснащением автоматизированными средствами контроля несущих конструкций доменного комплекса, разработка и освоение персоналом алгоритмов прогнозирования их технического состояния по результатам диагностирования является необходимым условием увеличения ресурса и безопасности кожухов ДП.

Для прогнозирования технического состояния разработан метод индекса безопасности, который, благодаря своей ресурсной трактовке, является универсальным, поскольку позволяет оперировать с повреждающими процессами различной природы. Индекс безопасности применительно к кожухам шахты ДП получает комплексный характер, что позволяет непосредственно оценивать их безопасность как для сложных технических систем, не прибегая при этом к обычной для таких ситуаций процедуре объединения рисков отдельных элементов. Это стало возможным, благодаря использованию в модели нагружения такого показателя как относительный объем действия.

**Литература**

1.Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций – М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.

2. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска /Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 52 с.

3. Проников А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 560 с.

4. Коновалов Л. В. Применение вероятностных методов расчета –возможности и реальность // Л. В. Коновалов, А. И. Сурков. - Кузнечно-штамповочное производство. -1989. - №12. - С. 24 - 25.

5. Прогнозирование технического состояния и обеспечение безопасности при эксплуатации механических систем в металлургии/ С. В. Белодеденко, В. И. Гануш, С. В. Филипченков, А. В. Попов // Вибрации машин: измерение, снижение, защита. - 2011. - №1. - С. 15 - 22.

6. Основи технічного обслуговування механічних систем за контролем безпеки/ С. Білодіденко, Г. Біліченко**,** В. Гануш, А. Попов // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту. - 2011. - спецвипуск, ч. 1. - С. 170 - 178.

7. Гребеник В. М., Цапко В. К. Надёжность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надёжности и долговечности): справочник – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.

8. Когаев В. П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени /Под. ред. А. П. Гусенкова; 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1993. - 364 с.

9. Harkins W. Spectral fatigue reliability /W. Harkins //Lesson NASA 0699, 1999-02-01.- 6p. ([www.\_nasa\_gov](http://www._nasa_gov)).

10. Huther M. Probabilistic and semi- probabilistic format in fatigue ship classification rules/ M. Huther, S.Maherault, G.Parmentier, G.Cesarine // Fatigue testing and analysis under variable amplitude loading. - Mayfield, PA: ASTM, 2005. - P. 535 - 543.

11. Клюев В. В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов //В. В. Клюев, А. С. Фурсов, М. В. Филиппов. - Контроль. Диагностика. – 2007. - №3. - С. 18 - 23.

12. Александровская Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. - М.: Логос, 2001. - 208 с.

13. Махутов Н. А. Риск применения и безопасность силовых систем // Н. А. Махутов, Л. А. Сосновский. – Трибофатика: тр. 4-го Междунар. симпозиума. – Тернополь: ТГТУ, 2002. – С. 44 – 49.

14. Гусев А. С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках / А. С. Гусев. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.

15. Беттхер З. Влияние динамических нагрузок на долговечность и надежность металлургических агрегатов// З. Беттхер.- Черные металлы. - 1995. -№ 3. – С. 15 - 26.

16. Диагностика и динамика прокатных станов /В. В. Веренев, В. И. Большаков, А. Ю. Путноки, А. А. Коринь, С. В. Мацко //ИМА-пресс, Днепропетровск, 2007. – 144 с.

17. Белодеденко С. В. Эффективность прогнозирования долговечности узлов прокатного оборудования и деформационные критерии усталости //С. В. Белодеденко, Д. Ю. Угрюмов. - Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2003. - №5. - С. 86 – 90.

18. Белодеденко С. В. Оценка безопасной долговечности элементов конструкций при проектировании и эксплуатации технологического оборудования //С. В. Белодеденко. - Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. -№6. - С. 40 - 46.

19. Белодеденко С. В. Накопление повреждений и оценка ресурса при нестационарном нагружениии с перегрузками и случайной асимметрией цикла //С. В. Белодеденко, Г. Н. Биличенко, Д. Е. Козаков. - Проблемы прочности. - 1997. № 2. - С. 49 - 55.

20. ГОСТ 25.597-85. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 31 с.

21. Чеченев В. А. Совершенствование конструкций элементов системы охлаждения шахт доменных печей /В. А. Чеченев. – Днепропетровск: Системные технологии, 1998. – 41 с.

22. РД 11-288-99. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2006.

23. Кандаков Г. П. Повышение надежности и ресурса кожухов доменных печей на основе оценки и прогнозирования состояния металла /Г. П. Кандаков, В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров, В. Д. Мартынчук - Промышленное и гражданское строительство. – 2007. - № 4. – С. 6 – 9.

24. Байшев Ю. П. Доменные печи и воздухонагреватели (конструкция, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты) /Ю. П. Байшев. - Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 994 с.

25. К расчету кожуха доменной печи на малоцикловую усталость /А. П. Махов, А. П. Лобцов, В. А. Сергеев, А. И. Бобинов. - Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1980. - №6. – С. 133 - 136.

26. Востров В. К. Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей. /В. К. Востров. - Промышленное и гражданское строительство. – 2007. - № 11. – С. 7 – 9.

27. Белодеденко С. В. Прогнозирование повреждения и живучести элементов конструкций с использованием моделей накопления повреждений /С. В. Белодеденко //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2010. - №1. - С. 49 - 52.