

От редакции

Научная школа МГТУ им. Г.И. Носова «Научные и методологические основы прогнозирования и повышения надежности элементов механических систем на базе эргодинамической концепции прочности материалов» под руководством проф., д-ра техн. наук Анцупова В.П. занимается разработкой фундаментальных положений теории проектной оценки надежности, общих принципов повышения долговечности технических объектов по кинетическому критерию прочности материалов, что позволило спроектировать и внедрить на промышленных и ремонтных предприятиях России ряд новых конструктивных решений различных устройств и механизмов с повышением не менее чем в два раза сроков службы.

Выполняются работы с ОАО «ММК», ОАО «НЛМК», АО АВТОВАЗ, АО «Вологодский подшипниковый завод», Рижское производственное объединение, ремонтное предприятие «ЦБПО СТИНО» (г. Нефтеюганск), МГП «Дизельаппаратура» (г. Ярославль), ремонтное предприятие СУПНР (г. Магнитогорск), Еманжелинский ремонтный завод и др.

Успешно развиваются творческие контакты с Петербургской научной школой «Трибология и надежность», Самарской научной школой «Современные проблемы трибологии» – научным центром РАН «Надежность», лабораторией конструкционных материалов института машиноведения УрО РАН и др.

Результаты научных исследований использованы при разработке рабочих программ по ряду дисциплин при подготовке студентов по направлению 1504.00.62 и 151000.68 – Технологические машины и оборудование и специальности 1504.04.65 – Металлургические машины и оборудование.

УДК 531.43/46

ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО КРИТЕРИЯМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Анцупов В.П.¹, Дворников Л.Т.², Громаковский Д.Г.³, Анцупов А.В. (мл.)¹, Анцупов А.В.¹

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

² Сибирский государственный индустриальный университет, Россия

³ Самарский государственный технический университет, Россия

Аннотация. Сформулированы основные принципы теории прогнозирования надежности нагруженных элементов механических систем на стадии их конструкторской разработки, положенные в основу создания методологии постановки и решения краевых задач для проектной оценки показателей безотказности и долговечности по критериям кинетической прочности материалов. Показан пример реализации методологии для проектного анализа и обоснования реконструкции привода вращения обжиговой печи агрегата для производства клинкера, которая внедрена в промышленное производство ОАО «МЦОЗ» группы компаний ОАО «ММК».

Ключевые слова: теория, основы, кинетическая прочность, методология, прогнозирование, надежность, безотказность, долговечность, отказ, повреждаемость, гамма-процентный ресурс.

Постановка проблемы

Практика эксплуатации различных механических систем показывает, что их надежность, как способность сохранять во времени работоспособное состояние, лимитируется главным образом техническим состоянием ее элементов – деталей и узлов наиболее нагруженных сборочных единиц, устройств и механизмов. Это связано с тем, что ведущие процессы утраты их работоспособности – разрушение или недопустимая пластическая деформация; много- и малоцикловая объемная усталость; множество видов поверхностного разрушения деталей при трении, являются причиной отказов практически 100% механических систем машин и агрегатов и приводят к значительным экономическим потерям.

В таких условиях с одновременным возрастанием требований к быстроходности, грузоподъемности, производительности и энергоемкости современных машин актуальной становится проблема обеспечения надежности механических систем на всех стадиях их

жизненного цикла. Первостепенную значимость приобретают этапы проектно-конструкторской разработки, особенно стадия конструирования, на которой при сравнительном анализе вариантов конструкции деталей, узлов и компоновке машины согласно ГОСТ 2.106-96 и нормативным рекомендациям [1] выполняется контрольную проверку (проверочные расчеты) надежности отдельных элементов и машины в целом. В этом плане главной проблемой теории надежности является предсказание поведения деталей и узлов механических систем в предполагаемых условиях внешнего нагружения, когда еще на стадии проектирования или эксплуатации с опережением времени становится возможным с необходимой степенью достоверности оценить показатели их безотказности и долговечности и проанализировать возможные способы обеспечения их требуемого уровня [2-6].

Несмотря на высокий уровень современных представлений о физической природе процессов повреждаемости и разрушения материалов, получить исчерпывающее теоретическое описание процессов

формирования отказов деталей машин пока не удается. Вопрос о чисто аналитической оценке процесса деградации нагруженных элементов и прогнозирования показателей их безотказности и долговечности на стадии конструирования в физической теории надежности остается наиболее открытым. В научном плане эта задача требует развития теоретической базы и новых методологических принципов построения моделей проектных отказов деталей, узлов и механизмов на стадии конструкторской разработки для поиска корреляции между ожидаемым ресурсом изделий, свойствами материалов и условиями эксплуатации.

Основные теоретические положения

Решение указанных проблем, на наш взгляд, возможно с использованием кинетического подхода, который рассматривает процесс разрушения материалов элементов механических систем как кинетический, развивающийся во времени процесс постепенной повреждаемости материалов и накопления дефектов их структуры на различных масштабных уровнях [7-10].

Основные научные положения физической теории надежности деталей машин, обобщающие практический опыт и отражающие объективные закономерности их стохастического поведения под нагрузкой, т.е. смену их состояния в процессе эксплуатации, могут быть сформулированы в виде совокупности следующих исходных принципов.

1. Объективный процесс деградации (старения) любого нагруженного объекта, протекающий с той или иной скоростью (мгновенно или постепенно), сопровождается изменением множества его свойств и характеризуется изменением значений *параметров*, количественно определяющих эти свойства. Поэтому на основе базового понятия «состояние объекта» [11] процесс деградации изделия при эксплуатации (его поведение или объективная смена состояний) отражается изменением выбранного параметра (параметров) объекта от его начального значения, соответствующего исходному моменту времени, до установленного в НТД конечного (предельного) значения, соответствующего моменту отказа изделия, т.е. определяется как *процесс формирования его параметрического отказа*.

2. С этой точки зрения, полагая, что выбранный контролируемый параметр является случайной величиной, распределенной по определенному закону, техническое состояние объекта в любой фиксированный момент времени эксплуатации определяется текущим вероятным значением параметра, а уровень его безотказности в этот момент количественно оценивается значением вероятности безотказной работы – вероятностью недостижения параметром его предельного значения.

3. Длительность эксплуатации изделия, его долговечность, определяется моментом достижения случайным параметром состояния предельного значения и количественно оценивается величиной его гамма-процентного ресурса для заранее заданной допустимой величины вероятности безотказной работы, равной гамма.

4. Текущее вероятное значение контролируемого *параметра* объекта определяется текущей степенью

поврежденности структуры его материала, а скорость изменения параметра – скорость деградации (старения) объекта, зависит от *скорости повреждаемости структуры материала* (скорости накопления в ней различного рода дефектов).

5. Скорость повреждаемости структуры материала изделия при его эксплуатации в соответствии с термодинамической теорией прочности твердых тел В.В. Федорова [8] может быть определена скоростью изменения (накопления) плотности внутренней энергии в наиболее нагруженных локальных объемах материала.

6. Для описания процесса деградации элементов механических систем, подверженных внешнему объемному нагружению, в качестве контролируемого параметра принимается плотность внутренней энергии в локальных объемах материала, величина которой при эксплуатации изменяется от начального до предельного значения, равного энтальпии материала при температуре плавления.

7. Для описания процесса деградации элементов механических систем, подверженных поверхностному нагружению в условиях внешнего трения, в качестве контролируемого параметра принимается линейный размер трибоэлемента, изменяющийся при эксплуатации от исходной до предельной величины, и функционально связанный с плотностью внутренней энергии в локальных объемах материала поверхностного слоя.

Практическая реализация теоретических разработок

С изложенных выше теоретических позиций разработана общая методология построения физико-вероятностных моделей (постановки и решения краевых задач) для проектной оценки показателей надежности двух классов объектов – объемно и поверхностно нагруженных деталей машин, по критериям кинетической прочности деформируемых материалов [12-15].

Для выбранного параметра X_t состояния объекта, изменение которого моделирует его поведение в процессе будущей эксплуатации, общий методологический подход сформулирован в виде семиэтапной совокупности правил построения замкнутой системы уравнений для оценки:

– скорости деградации изделия $\dot{X}_t$, в функции скорости повреждаемости структуры материалов (скорости изменения плотности внутренней энергии локальных объемов материала) $\dot{i}_t$ или для стационарных условий нагружения $\dot{X}(\dot{i}_e)$. Здесь, $\dot{X}$ – постоянная во времени скорость старения изделия, $\dot{i}_e$ – скорость повреждаемости структуры (скорость изменения потенциальной составляющей плотности внутренней энергии);

– вероятности безотказной работы изделия на любой фиксированный момент эксплуатации $P(t) = P(X_t < x_{np})$, где x_{np} – предельное значение параметра состояния X_t ;

– гамма-процентного ресурса изделия $t_\gamma(X_0, \dot{X}, [P(t) = \gamma])$, где X_0 – распределение случайного параметра X_t в начальный момент времени $t = t_0$, $[P(t) = \gamma]$ – допустимое значение вероятности безотказной работы, для заданных условий однозначности – расчетной схемы нагружения изделия, его отличительных особенностей, начальных и граничных условий, закона распределения параметра X_t .

Реализация предложенной методологии для проектной оценки и повышения долговечности различных деталей узлов трения подробно описана в работах [16-22]. В данной статье показано ее использование для объемно нагруженных изделий.

Ниже в качестве примера представлен вариант проектной оценки долговечности привода вращения обжиговой печи D-4,5xL-125 агрегата для производства клинкера в ОАО «МЦОЗ» группы компаний ОАО «ММК», по критериям кинетической прочности материала нагруженных элементов, общий вид которого и кинематическая схема изображены на рисунке.

Причиной проектных исследований надежности привода вращения обжиговой печи и разработки вариантов ее реконструкции после примерно четырех лет его безотказной работы явилось неожиданное возникновение внезапных отказов привода по критериям нарушения прочности ряда деталей. В первую очередь, по причине разрыва ближних к печи болтов крепления подшипниковых опор вала-шестерни 4.1 открытой зубчатой передачи (см. рисунок), затем траверсы крепления зубчатого венца 4.2, далее сварных швов ее крепления к корпусу печи и др.

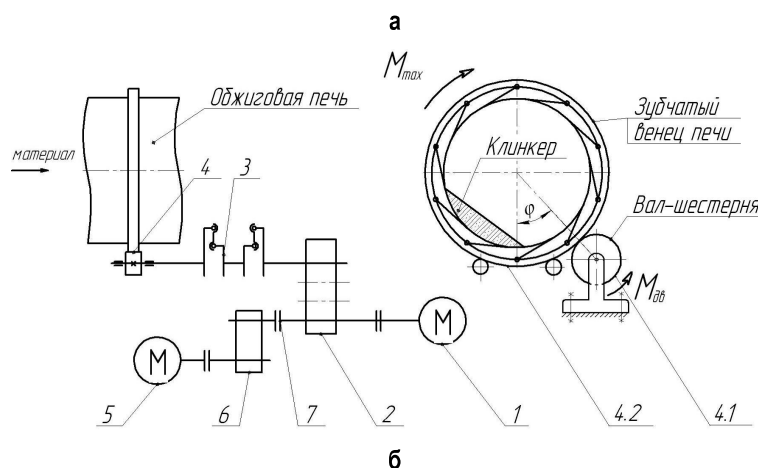
В соответствии с изложенными выше этапами общей методологии проектной оценки изделий по критериям кинетической прочности материалов была поставлена краевая задача для оценки среднего ресурса $t_\gamma = t_{50} = \bar{t}$ привода по условию прочности болтов крепления опор вала-шестерни 4.1 (см. рисунок), расположенных ближе к печи и подвергающихся растяжению согласно показанной кинематической схеме.

Постановка задачи в соответствии с изложенными выше теоретическими принципами и общим методологическим подходом [12-15] сформулирована в следующем виде.

I. На первом этапе в качестве параметра X_t состояния болтов крепления с площадью поперечного сечения S_0 , в которых под действием длительной стационарной внешней нагрузки F при температуре T возникают внутренние напряжения

$\sigma = F / S_0$, принимаем плотность потенциальной энергии дефектов u_{et} . Распределение случайной величины $X_t = u_{et}$ в любой момент времени t , как параметра, зависящего от множества независимых случайных факторов, будем полагать нормальным согласно центральной предельной теореме теории вероятностей [2].

Для упрощения математических выражений будем оперировать с ее средним значением $\bar{u}_{et}$. Эта величина характеризует текущую степень поврежденности структуры локальных объемов материала деталей и со скоростью $\dot{\bar{u}}_e$ возрастает со временем в поле приложенных напряжений от начального значения $\bar{u}_{e0}$ до предельного (критического) – $u_{ekp} = \Delta H_S$. Здесь ΔH_S – энтальпия материала при температуре плавления.



Общий вид 125-метровой печи и кинематическая схема привода:

- 1 – главный двигатель, АОЗ-400М-6У2, $N = 315 \text{ кВт}$, $n = 985 \text{ об/мин}$; 2 – редуктор, ЦТ-2900-86,46, $u = 86,46$; 3 – муфта Ивачева; 4 – открытая зубчатая передача (4.1 – вал-шестерня, 4.2 – венец) $u = 7,5$; 5 – электродвигатель 4АР225, $N = 30 \text{ кВт}$, $n = 735 \text{ об/мин}$; 6 – редуктор Ц2У-315-16-21У2, $u = 16,43$; 7 – кулачковая муфта

II. На втором этапе формулируем уравнение состояний болтов при эксплуатации:

$$\bar{u}_{e t} = \bar{u}_{e 0} + \bar{\dot{u}}_e \cdot t, \quad (1)$$

где $\bar{u}_{e 0} = \frac{(0,071 \cdot HV)^{2,4}}{6 \cdot G \cdot (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^2}$ –

среднее значение плотности скрытой энергии материала в исходном состоянии, HV – твердость по Виккерсу.

III. На третьем этапе формулируем один из упрощенных вариантов кинетического уравнения повреждаемости структуры локальных объемов материала болтов для определения скорости $\dot{u}_e$ накопления в них энергии дефектов [12]:

$$\dot{u}_e = \frac{k_\sigma^2 \cdot A_0 \cdot \sigma^2}{6 \cdot G(T) \cdot v} \cdot M_R^{-2}, \quad (2)$$

где k_σ – коэффициент перенапряжения межатомных связей

$$k_\sigma = \frac{I}{6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2}}; \quad (2.a)$$

A_0 – коэффициент влияния напряжений и температуры на скорость повреждаемости,

$$A_0 = \frac{v \cdot U(\sigma, T)}{h \cdot N_0} \exp \left[-\frac{U(\sigma, T)}{R \cdot T} \right]; \quad (2.б)$$

$U(\sigma, T)$ – энергия активации процесса разрушения межатомных связей при данном напряжении σ и температуре T ,

$$U(\sigma, T) = U_0 - \Delta U(T) - \left(\frac{M_R^{-2} \cdot k_\sigma^2}{18 \cdot v \cdot K(T)} \right) \cdot \sigma^2; \quad (2.в)$$

$\Delta U(T)$ – доля энергии активации, определяемая температурой изделия T :

$$\Delta U(T) = \frac{3}{2} \cdot \alpha_0 \cdot K(T) \cdot T; \quad (2.г)$$

$K(T)$ – коэффициент всестороннего сжатия материала при температуре T :

$$K(T) = \frac{E(T)}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu(T))}; \quad (2.д)$$

$E(T)$ и $\mu(T)$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала при температуре T ;

M_R^2 – коэффициент эквивалентности напряженного состояния

$$M_R^2 = \frac{(1+r)^2 + (1-r)^2}{4}; \quad (2.e)$$

$G(T)$ – модуль упругости материала при температуре T

$$G(T) = \frac{E(T)}{2 \cdot (1 + \mu(T))}. \quad (2.ж)$$

IV. На данном этапе (пропуская все промежуточные операции, не требуемые для решения задачи) оцениваем средний ресурс элемента до его разрушения

$$\bar{t} = \Delta u_{e kp} / \bar{\dot{u}}_e = (\Delta H_S - u_{e 0} - u_T) / \dot{u}_e, \quad (3)$$

где $u_T = \int_0^T \rho \cdot c \cdot dT$ – тепловая составляющая плотности внутренней энергии материала нагруженной детали при температуре T ; ρ , c – плотность и теплоемкость материала.

Решением поставленной краевой задачи для начальных и граничных условий эксплуатации болтов крепления установлена объективность возникновения описанных выше внезапных отказов привода:

– средний расчетный срок их службы для краевых условий нагружения, когда по исходной схеме они подвержены растяжению, не превышает $\bar{t} \approx 4,1$ года;

– по истечении указанного срока плотность энергии дефектов структуры материала достигает предельного значения $u_{e kp} = 10,4$ Дж / мм³, соответствующего энтальпии материала в жидком состоянии $\Delta H_S = 10,5$ Дж / мм³, что и является объективной причиной разрушения болтов крепления и отказа привода.

Для устранения причин возникновения отказов предложены два эквивалентных, полностью разгружающих эти детали варианта реконструкции привода – его перенос на противоположную от печи сторону или смена направления вращения печи на противоположное. Экономически целесообразным оказался второй вариант.

Проектная оценка долговечности привода новой конструкции по алгоритму решения задачи (1)-(3) показала, что ожидаемый ресурс новой конструкции превышает $\bar{t} \approx 4 \cdot 10^4$ лет, что исключает возникновение его внезапных отказов с вероятностью, близкой к единице. Предложенный вариант реконструкции привода внедрен в 2013 году в ОАО «МЦОЗ» группы компаний ОАО «ММК».

Заключение

1. На основе базовых понятий теории надежности технических объектов и современных достижений физики и механики повреждаемости и разрушения твердых тел сформулированы основные принципы построения физико-вероятностных моделей отказов элементов механических систем на стадии их конструирования.

2. Предложенный подход реализован в виде методологии постановки и решения краевых задач для проектной оценки показателей безотказности и долговечности деталей машин в различных условиях их эксплуатации для заданных условий однозначности – расчетной схемы нагружения, отличительных признаков, начальных и граничных условий.

3. Выполнены проектные исследования и обоснование реконструкции привода вращения обжиговой печи для производства клинкера с повышенным сроком службы.

Список литературы

1. Надежность машиностроительной продукции: практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. М.: Изд-во стандартов, 1990. 328 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
3. Дворников Л.Т., Туров В.А. Состав и структура свойств надежности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1988. №5.
4. Дворников Л.Т., Туров В.А. Особенности проектирования надежности // Стандартизация и управление качеством: Экспресс-информация КиргизНИИТИ. Фрунзе, 1989. Вып. I.
5. Дворников Л.Т., Туров В.А. Оценка уровня надежности гидросистем буровых агрегатов на стадии проектирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1986. №6. С. 62-67.
6. Диагностика состояния и оценка остаточного ресурса элементов машин и конструкций / М.Б. Бакиров, Д.Г. Громаковский, А.В. Дынников и др. // Контроль. Диагностика. 2004. №1. С. 26.
7. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
8. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1985. 165 с.
9. Громаковский Д.Г. Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения. 2000. №1. С. 3.
10. Громаковский Д.Г., Силаев Б.М., Логвинов Л.М. Проблемы разработки термофлуктуационной модели изнашивания поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №6. С. 45-48.
11. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 10 с.
12. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun.), Antsupov V.P. Methodology of machine elements' reliability prediction by means of various criteria (Methodology of forecasting reliability of machine elements by various criteria) // Dependability, 2013. №3(46). P. 15-23.
13. Оценка долговечности нагруженных деталей по кинетическому критерию прочности / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Материалы 70-й научно-технической конференции: сб. докл. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. Т.1. С. 137-141.
14. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun.), Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria (Проектная оценка надежности элементов машин по критериям работоспособности) // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. №5(45). С. 62-66.
15. Методология вероятностной оценки элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 29-37.
16. Анцупов А.В. Научные и методологические основы прогнозирования параметрической надежности трибосопряжений на стадии проектирования // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Н.Н. Огаркова. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2011. С. 36-39.
17. Прогнозирование надежности трибосопряжений на основе термодинамического анализа процесса трения / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №3. С. 54-60.
18. Прогнозирование безотказности трибосопряжений по критерию износостойкости на стадии их проектирования / Анцупов А.В., Анцупов В.П., Анцупов А.В. (мл.) и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. №11. С. 38-45.
19. Методология вероятностного прогнозирования безотказности и ресурса трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.С. Губин и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, №4(3). С. 947-950.
20. Научные и методологические основы прогнозирования надежности трибосопряжений на стадии их проектирования / А.В. Анцупов, М.В. Чукин, А.В. Анцупов (мл.) и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 56-61.
21. Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов В.П. Методология прогнозирования надежности трибосопряжений // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. №2. С.3-9.
22. Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов В.П. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 293 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FUNDAMENTALS OF PHYSICAL THEORIES RELIABILITY OF MACHINE PARTS ON CRITERIA KINETIC STRENGTH OF MATERIALS

Antsupov Victor Petrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: antsupov.vp@gmail.com.

Dvornikov Leonid Trofimovitch – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Theory of Mechanisms and Machine Elements Department, Siberian State Industrial University. Phone: 8(843)46-57-91. E-mail: tmmiok@yandex.ru

Gromakovskii Dmitry Grigorievich – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of Science and Technology center «Reliability technology, energy and transport vehicles», Samara State Technical University. Phone: 8(8463)32-19-31. E-mail: pnms3@mail.ru

Antsupov Alexei Viktorovich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: ants@mgn.ru.

Antsupov Alexander Viktorovich – C Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519)24-85-19. E-mail: antsupov.alexander@gmail.com.

Abstract. The main principles of the theory of reliability prediction of mechanical systems loaded elements in the stage of design development, underlying the creation of methodology for formulating and solving boundary value problems for project evaluation of reliability and durability criteria for kinetic strength of materials were stated. The example of the implementation methodology for project analysis and justification reconstruction drive rotation of the kiln for clinker production unit, which is integrated in the industrial production of OJSC «MCRP» among OJSC «MMK» group, is shown.

Keywords: theory, basics, kinetic strength, methodology, forecasting, reliability, dependability, durability, failure, damage susceptibility, gamma-percent life.

References

1. Reliability engineering products: practical guidance on standardization, validation and maintenance. Moscow: Publisher standards, 1990. 328 p.
2. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Machine parametric safety]. Moscow: Publishing House of the MSTU N.E. Bauman, 2002. 560 p.
3. Dvornikov L.T., Turon V.A. Composition and structure properties of reliability. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining]. 1988. no. 5.
4. Dvornikov L.T., Turon V.A. Features design reliability. *Standartizatsiya i upravlenie kachestvom: Ekspress-informatsiya KirgizNIITI* [Standardization and quality management: Express Information KirgizNIITI]. Frunze, 1989. Iss. I.

5. Dvornikov L.T., Turov V.A. Assessing the level of reliability of hydraulic drilling rigs at the design stage. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems of mining]. 1986, no. 6, pp. 62-67.
6. Bakirov M.B., Gromakovskii D.G., Dynnikov A.V. etc. Diagnosis and assessment of the state of residual life of machines and structures. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2004, no. 1, p. 26.
7. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomaszewski E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow: 1974, 560 p.
8. Fedorov V.V. *Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tverdykh tel*. [Kinetics of solid damageability and break-down]. Tashkent: Publishing House «Fan» UzSSR, 1985, 165 p.
9. Gromakovskii D.G. Destruction surfaces in friction and wear and development of a kinetic model of wear. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of engineering]. 2000, no. 1, p. 3.
10. Gromakovskii D.G., Silaev B.M., Logvinov L.M. Problems of development thermofluctuational models wear surfaces. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction and lubrication in machinery]. 2009, no. 6, pp. 45-48.
11. GOST 20911-89. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya*. [Technical diagnostics. Terms and definitions]. Moscow: Publisher standards, 1990, 10 p.
12. Antsupov A.V. Methodology of machine elements' reliability prediction by means of various criteria / A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (jun.), V.P. Antsupov // Dependability, 2013, no. 3(46), pp. 15-23.
13. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P. et al. Evaluation of durability stressed parts on the kinetic strength criterion. *Materialy 70-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii: sb. dokl. Magnitogorsk* [Proceedings of the 70th Scientific Conference: Sat Reports]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, vol. 1, pp. 137-141.
14. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun), Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 5(45), pp. 62-66.
15. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P. et al. The methodology of probabilistic assessment of machine elements according to different criteria. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov: mezhregion. sb. nauch. tr. / pod red. Korchunova A.G.* [Mechanical equipment of metallurgical plants. Ed. Korchunov A.G.]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, pp. 29-37.
16. Antsupov A.V. The scientific and methodological basis of forecasting reliability triboconjugation parametric design stage. *Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroeniya: mezhdunar. sb. nauch. tr. / pod red. N.N. Ogarkova* [Modern construction methods and technologies metallurgical engineering: Ed. N.N. Ogarkov]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, pp. 36-39.
17. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Slobodyanskii M.G. et al. Reliability prediction and other friction units based on the thermodynamic analysis of the process of friction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov]. 2010, no. 3, pp. 54-60.
18. Antsupov A.V., Antsupov V.P., Antsupov A.V. et al. Prediction reliability friction units by the criterion of wear on the stage of their projection-transformation. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction and lubrication in machinery]. 2010, no. 11, pp. 38-45.
19. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Gubin A.S. et al. The methodology of probabilistic forecasting reliability and service life of tribological. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences]. 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 947-950.
20. Antsupov A.V., Chukin M.V., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P. The scientific and methodological basis of forecasting reliability triboconjugation at the design stage. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011, no. 4, pp. 56-61.
21. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P. Methodology for predicting the reliability of tribological. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction and lubrication in machinery]. 2012, no. 2, pp. 3-9.
22. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov V.P. *Obespechenie nadezhnosti uzlov treniya mashin na stadii proektirovaniya* [Ensuring the reliability of friction units of machines at the design stage]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 293 p.