

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основной проблемой машиностроения, решаемой в настоящее время, является проблема повышения качества, надежности и долговечности создаваемых машин. От надежности и долговечности зависит эффективность использования машин в различных отраслях народного хозяйства. При низкой степени надежности и долговечности машин появляются потери, связанные с остановкой технологических процессов, простоем машин и оборудования, их ремонтом, что является серьезным препятствием для дальнейшего внедрения автоматизации и механизации производственных процессов.

По мере развития техники вопросы повышения долговечности современных машин приобретают все большее значение. Изучением причин разрушений деталей в эксплуатации и разработкой методов повышения долговечности на протяжении ряда десятилетий занимаются ученые и специалисты во всем мире.

В результате повышения долговечности деталей машин сокращается расход запасных частей и материалов на их изготовление, снижаются затраты труда при эксплуатации и ремонте машин. Увеличение срока службы машин равноценно увеличению их выпуска на тех же производственных площадях. Поэтому, решая задачи повышения долговечности машин, мы тем самым как бы увеличиваем мощности машиностроительных предприятий.

В настоящее время имеются разнообразные эффективные способы повышения долговечности деталей машин. Ведущая роль в создании долговечных и надежных конструкций машин принадлежит конструкторам и технологам, которые на всех этапах создания машины (конструирование, изготовление, доводка) оказывают непосредственное влияние на технические характеристики машины и работоспособность отдельных узлов и деталей. На основе научного анализа сведений, имеющихся в литературе, а также личного опыта и знаний конструктор и технолог должны найти оптимальные конструктивные решения, правильно выбрать материал и назначить рациональные технологические методы изготовления и упрочнения деталей машин.

Применение термической и химико-термической обработки, легированной стали, применение износостойких наплавок и покрытий, упрочнение пластическим деформированием позволяют повысить прочность и износостойкость деталей в несколько раз. Весьма перспективным направлением в области повышения долговечности деталей машин является создание и применение саморегулирующихся систем и механизмов. Большой эффект достигается при применении новых материалов и покрытий, таких как пластмассы, древопластики, металлокерамика, керметы, твердые сплавы и композиционные материалы.

В середине XIX в., в период расцвета металлургии железа, начали обнаруживаться случаи внезапного хрупкого разрушения осей почтовых карет, шеек вагонных осей и т. п. Производственные расчеты показали, что рабочее напряжение, при котором происходит разрушение, значительно ниже допустимого для данного материала. При исследовании этого явления было установлено, что подобного рода разрушения наблюдаются в тех случаях, когда металл подвергается большому числу повторных нагрузок и разгрузок или же нагрузок противоположного направления, таких как смена растяжения и сжатия, повторные изгибы в противоположные стороны, т.е. в условиях многократной смены напряжений.

Более обстоятельное исследование этого явления, проведенное уже в конце XIX в., позволило выявить внешнюю

механическую картину разрушений от повторных нагрузок. Эти разрушения были объяснены свойством металла разрушаться при многократной смене напряжений. Явление получило название усталости, а внезапные разрушения, вызванные сменой напряжений, получили название усталостных разрушений.

Обнаруженное свойство металла уставать и подвергаться усталостным разрушениям имеет чрезвычайно большое практическое значение, которое буквально с каждым годом играет все возрастающую роль, так как оно прямым образом влияет на надежность эксплуатации машин и механизмов.

Объясняется это следующим. С каждым годом повышаются рабочие скорости новых машин, а с ростом рабочих скоростей увеличивается число переменных напряжений, которое должна испытать та или иная деталь машины и, таким образом, уменьшается надежность эксплуатации всей машины в целом.

Современные машины (механизмы) за период их эксплуатации до списания (utiлизации) подвергаются весьма большому числу переменных нагрузок, как это видно из таблицы П.1 [85], [97].

Таблица П.1

**Переменные нагрузки, которые воспринимают детали машин**

Сооружение или его часть	Число переменных нагрузок в течение срока службы
Железнодорожный мост	$2 \cdot 10^7$
Балка подвесного пути	$40 \cdot 10^6$
Вал авиационного двигателя	$18 \cdot 10^8$
Вагонные оси	$50 \cdot 10^8$
Коленчатый вал автомобильного двигателя	$12 \cdot 10^7$
Ось тепловоза	$40 \cdot 10^7$
Вал паровой турбины	$15 \cdot 10^9$
Лопатки паровых турбин	$25 \cdot 10^{10}$

В авиации число повторных нагрузок достигает ещё более высоких значений. Например, для транспортных самолетов число повторных нагрузок за срок службы самолета

только в результате механических вибраций достигает от  $10^8$  до  $10^{12}$  [85]. Особенno большое значение усталостная прочность имеет для современной реактивной пилотной и беспилотной авиации. Здесь наряду с действием различных вибраций имеют большое значение усталостные разрушения элементов самолётной конструкции, находящихся вблизи струй реактивных двигателей. Эти разрушения обусловливаются пульсирующими акустическими давлениями, вызванными реактивной струей, как источником весьма сильного шума. Так, исследованиями установлено, что в отдельных случаях звуковая энергия реактивной струи может достигать порядка 1% мощности двигателя. Мощности реактивных самолетов и ракет непрерывно увеличиваются, поэтому определение границ усталостного разрушения под влиянием пульсирующих акустических давлений, что влияет на надежность эксплуатации авиационной техники, имеет огромное практическое значение, тем более, что частота акустических давлений достигает сотен циклов в секунду.

Аналогичные последствия, резко интенсифицирующие усталостные разрушения, оказывают пульсирующие акустические давления на элементы хвостовой части крыла и закрылков, обшивку фюзеляжа, обшивку и нервюры горизонтального оперения. Высокая частота пульсирующих акустических давлений приводит к тому, что проблема усталостных разрушений становится чрезвычайно актуальной даже для конструкций с весьма малой продолжительностью полета, в том числе и для аппаратов одноразового действия.

В тех случаях, когда повторные напряжения в результате акустических давлений оказываются ниже предела выносливости, они весьма неблагоприятно влияют на срок службы реактивных аппаратов. Объясняется это, главным образом, их высокой частотой, в некоторых случаях достигающей до 10 000 цикл/с. Существенно и то, что при постоянном режиме работы двигателя амплитуда и частота акустических давлений от реактивной струи не являются постоянными, а изменяются в случайном порядке. Это усложняет методы повышения усталостной прочности, а следовательно, и надежности машин.

Недостаточная усталостная прочность некоторых самолётных конструкций значительно снижает безопасность полетов. Известно, что за период войны в результате только усталостных разрушений разрушились в воздухе десятки английских бомбардировщиков «Веллингтон».

Обширные исследования по усталостной прочности и, как следствие, повышения надежности эксплуатации изделий, необходимы не только для авиации. Без преувеличения можно сказать, что сейчас нет ни одной отрасли промышленности, где бы вопросам усталостной прочности не уделялось большое внимание.

Большое внимание уделяется исследованию природы усталостного разрушения и созданию теории усталости. В настоящее время существуют различные теории усталости. В этих теориях отсутствует единая точка зрения на процесс усталостного разрушения, однако новейшие исследования и применение теории дислокаций при изучении природы усталостного разрушения способствовали выяснению механизма усталостного разрушения, что позволяет повысить надежность изделий.

Аналитическая и прикладная теории надежности технических систем, берущие начало по времени с конца Второй мировой войны, характеризуются стремительным развитием в последующие годы. К началу 1960-х гг. теория надежности вполне сформировалась как научная дисциплина, как раздел проектирования сложных систем. Развитие теории надежности на начальных этапах осуществлялось по двум направлениям: первое началось с изучения автоматов Дж. фон Нейманом, К. Шеноном и Э. Ф. Муром (США) в попытке синтезировать надежные системы из менее надежных элементов; второе — относилось к динамическому анализу изменения надежности систем во времени.

Стремительное развитие теории надежности было обусловлено рядом обстоятельств. С одной стороны — востребованностью промышленности, выпускающей все более усложняющиеся системы (особенно в технике вооружений, зарождающейся космической технике и др.). С другой стороны — наличием огромных наработок по теории вероятностей, математической статистике, теории массового

обслуживания. Хотя статистические методы в теории проектирования сложных систем к тому времени, благодаря развивающейся технической кибернетике (работы Н. Винера, К. Шенона), получали достаточно широкое применение, существовал огромный резерв разработок, востребованных с самого начала теорией надежности. Отметим основополагающие работы С.Н. Бернштейна, А.Н. Колмогорова, В. С. Пугачёва, А. Я. Хинчина, А. М. Яглона и др. Эти работы по теории вероятностей и математической статистике, ставшие классическими, позволили поставить и решить многие задачи теории надежности.

Что касается техники надежности, то она сформировалась и успешно развивалась в рамках программ Вооруженных сил США [58]. В 1952 г. Министерство обороны США образовало консультативную группу по надежности электронного оборудования (AGREE), которая разработала рекомендации по количественным требованиям на надежность, методы осуществления программ контроля и гарантии выполнения этих требований. За период 1952–1967 гг. в зарубежной практике был накоплен определенный опыт в технике надежности, представленный в трехтомном справочнике [75].

В СССР работы по теории надежности появились с некоторым временным сдвигом и получили всестороннее развитие особенно после преодоления искусственно созданного барьера в становлении кибернетики (как общей науки, так и ее технического приложения). Примерно с 1955 по 1975–1980 гг. были выполнены разработки и опубликованы материалы практически по всем разделам теории надежности, начиная от основополагающих работ А. И. Берга, Б. В. Гнеденко, И. М. Маликова, Я. Б. Шора и др.

Вопросы влияния механической обработки заготовок на надежность работы деталей машин и механизмов в целом, во взаимосвязи влияния микрографии и состояния приповерхностного слоя металла, рассматривали С. В. Сренсен, Э. А. Сатель, И. А. Одинг, Е. М. Шевардин. Следует отметить также большой вклад П. Е. Дьяченко, А. И. Исаевой, В. А. Кривоухова, А. А. Маталина, Л. А. Гликмана, Б. И. Костецкого, М. О. Якобсона, М. М. Хрущова, И. В. Кра-

гельского, Д. Н. Решетова, И. В. Кудрявцева, А. П. Гуляева, И. Е. Конторовича, Ю. М. Лахтина и др.

Помимо работ по теории надежности [3], [6], [15]–[18], [24], [29], [40], [42], [46], [55], [63], [65], [67], [68], [79], [94] и др. отечественных авторов, осуществлен перевод важнейших зарубежных работ [22], [23], [25], [35], [36], [66], [71], [75], [92], [98] и др. С точки зрения техники надежности важными являются исследования, выполненные по отраслям машиностроения и приборостроения: применительно к системам автоматического регулирования [7], [21], [42], [44], [52], [65], [69], [77], [79]; летательным аппаратам и их агрегатам [15], [21], [29], [85], [97]; металлообрабатывающему оборудованию [11], [12], [14], [64], [65], [67], [77], [78]; строительным и землеройным машинам [7], [19], [26], [55], [73]. Вопросы надежности строительных конструкций и применение соответствующих методов получили широкое распространение благодаря исследованиям В. В. Болотина.

Наряду с работами, посвященными теории надежности, создавалась нормативная и справочная база. Можно отметить справочники [1], [19], [37], [39], [73], [75]–[77], [91], [96] и методические разработки [9], [10], [18], [29], [31], [38], [44], [53], [54], [62]. Современная библиография работ по теории надежности труднообозрима, поскольку включает многие десятки монографий и многие сотни научных статей (не считая работ, примыкающих к этой проблеме). Поэтому, имея в виду весьма ограниченные цели настоящей работы, не ставилась задача дать сколько-нибудь полный обзор направлений и соответствующих работ. Поэтому в списке литературы приведены лишь те наименования работ, к которым в основном пришлось обращаться по мере изложения материала.

Естественно, в учебнике принятого относительно небольшого объема, изложить на необходимом уровне большинство задач теории надежности не представляется возможным. Поэтому для учебника были отобраны лишь некоторые важнейшие задачи.

Как показывает опыт подготовки специалистов с высшим техническим образованием «Теория надежности» (при разных наименованиях этой дисциплины) получает

все большее применение в современных ФГОС и как самостоятельная дисциплина, и как составная часть ряда дисциплин. Поэтому рамки применения данного учебника считаем достаточно широкими. По мере накопления опыта применения данного учебника в учебном процессе могут быть внесены соответствующие корректизы в последующие издания.

Данный учебник был задуман давно по совету и при содействии по подбору литературы проф. В. Л. Вейца. Памяти этого большого ученого и педагога посвящается данный учебник.

Автор выражает искреннюю признательность коллегам: проф. А. Г. Ташевскому и доц. В. Г. Юрьеву — за помощь в работе по составлению учебника, а также рецензентам: проф. В. В. Максарову и проф. М. Г. Кристалю — за ценные замечания и советы, которые, на наш взгляд, позволили повысить его качественный уровень.

---

## ГЛАВА 1

# НАДЕЖНОСТЬ МАШИН. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ

Основные понятия и термины, используемые при расчете и анализе различных технических систем на надежность, регламентированы ГОСТ 21623-76, ГОСТ 18322-78, ГОСТ 16504-81, ГОСТ 27.002-83, ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.301-95, ГОСТ Р 53480-2009 [58]–[60]. Ниже приводятся основные понятия и определения, необходимые для понимания излагаемого в учебнике материала. Отметим, проблема надежности и соответствующая теория надежности (эти термины будут определены ниже), возникшие в основном в конце 1940-х — начале 1950-х гг., продолжают оставаться актуальными. Многоплановость решаемых задач и многообразие подходов к их решению породили огромное число публикаций в виде монографий, тематических научных сборников, особенно различных статей, справочников общего назначения (не считая ведомственных материалов). Хотя пик этих публикаций как будто бы позади, число работ остается достаточно большим. Долгое время сохраняется известный разрыв экспериментальных и теоретических исследований. Хотя за последние 30–35 лет появились монографии и справочники по данной проблеме применительно к определенным классам машин, приборов и сооружений [3], [4], [6], [7], [13]–[16], [18], [23], [24], [27], [29], [36], [39], [40], [42], [44], [46], [51], [63], [65], [68], [78], [79], [85], [91], [94], [97], количество экспериментальных данных, необходимых для выполнения достоверных расчетов, продолжает быть недостаточным.

Ниже рассматриваются некоторые ключевые проблемы надежности машин, основу которых составляют механические системы. Однако современная машина (технологическая, энергетическая, транспортная) представляет собой обычно сложное конструктивно-компоновочное объединение не только чисто механических узлов, но и электроприводов, гидро- и пневмоприводов, систем автоматического регулирования и управления. Естественно, каждый из отмеченных узлов характеризуется определенной спецификой проблемы надежности. Поэтому, рассматривая проблему надежности машины определенного класса, необходимо учитывать и эту специфику. В соответствии с указанным, трудно представить себе такой учебник, который мог бы охватить всю данную проблему в целом.

Вместе с тем, естественно, существуют некоторые ключевые вопросы, общие для всех машин, независимо от принадлежности их к определенному классу. Именно они и представляют основной интерес. Итак, рассмотрим некоторые определения.

*Технический объект* (объект, ТО) — объект, подлежащий расчету, анализу, испытанию и исследованию в процессе его проектирования, изготовления, применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования в целях обеспечения его функционального назначения.

*Механическая система* (система) — сложный объект, представляющий собой совокупность функционально связанных и расположенных в определенном порядке объектов. Механическими системами (МС) могут выступать машины, агрегаты, сборочные единицы, которые могут быть подсистемами более сложных систем.

*Элемент* (механической системы) — объект, представляющий собой часть МС в конкретном исследовании.

Понятия «система» и «элемент» должны рассматриваться как целое и часть в конкретном исследовании и поэтому данные понятия являются относительными.

Основополагающим является понятие *надежность* — свойство объекта выполнять и сохранять во времени за-

данные ему функции в установленных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность — внутреннее свойство объекта, проявляющееся во взаимодействии с другими объектами, входящими в МС, а также с внешней средой. Являясь комплексным свойством, надежность объекта оценивается через показатели частных свойств (безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость), в отдельности или в сочетании. Технологические машины, как правило, оцениваются тремя первыми показателями.

*Теория надежности* — наука, устанавливающая и изучающая количественные характеристики (критерии) надежности, исследующая связь между показателями надежности и эффективности:

- разрабатывает методы проведения испытаний на надежность, методы обработки и оценки результатов этих испытаний;
- разрабатывает методы контроля надежности, оптимизации режимов регламентных работ при эксплуатации изделия, обоснования норм запасных частей (элементов, деталей);
- разрабатывает методы установления режимов и выбора характеристик, обеспечивающих оптимальную надежность; выбора оптимальных конструкций и схем, обеспечивающих наилучшим образом заданную надежность; оптимальные методы отыскания неисправностей и пр.;
- использует при решении задач надежности результаты исследований физических и химических процессов, лежащих в основе явлений, связанных с потерей качества изделий;
- использует в ряде разделов методы теории вероятностей, математической статистики, теории информации, теории массового обслуживания, линейного и нелинейного программирования, методы математической логики и статистического моделирования на ЭВМ и пр. [17], [18], [23], [44], [52]–[54], [56]–[60].

*Показатель надежности* — величина, характеризующая одно из свойств (единичный показатель) или несколько свойств (комплексный показатель).

*Надежность* — свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

*Работоспособность* — состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

*Отказ* — полная или частичная утрата изделием работоспособности.

*Неисправность* — состояние изделия, при котором оно в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

*Безотказность* — свойство изделия сохранять работоспособность непрерывно в течение некоторого времени, проявляющееся, в зависимости от назначения объекта, как в режиме его работы, так и в режиме ожидания работы.

*Долговечность* — свойство изделия сохранять работоспособность до перехода в предельное состояние с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Характеризует продолжительность работы объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами для восстановления его работоспособности в плановых и внеплановых ремонтах и техническом обслуживании.

*Ремонтируемость* — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности путем технического обслуживания и ремонта.

В указанных определениях использованы термины: отказ, предельное состояние, наработка.

*Предельное состояние* — состояние изделия, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

*Наработка* — продолжительность или объем работы изделия в течение рассматриваемого периода.

Рассмотрим критерии состояния изделия, базирующиеся на выполнении (невыполнении) требований НТД (нормативно-технической документации).

*Критерий исправного состояния* (состояния, при котором он удовлетворяет всем требованиям НТД) — установленные НТД параметры технической характеристики, внешнего вида, эргономики, дизайна и пр.

*Критерий неисправного состояния* (состояния изделия, при котором он не удовлетворяет требованиям НТД) — выход за установленные пределы хотя бы одного параметра при сохранении изделием работоспособности полностью или частично в заданных или щадящих режимах применения, оговоренных НТД.

*Критерием неработоспособного состояния* изделия является выход за пределы установленного в НТД значения хотя бы одного параметра технической характеристики при невозможности дальнейшего применения изделия без устранения причин отказа.

*Критерием предельного состояния* изделия является такое его неработоспособное состояние, при котором по установленным в НТД признакам фиксируется факт недопустимости его дальнейшего применения по назначению и необходимости его замены или капитального ремонта.

Остановимся также на важнейших понятиях — ресурс, срок службы, срок сохраняемости.

*Ресурс* — наработка изделия от начала его применения до наступления его предельного состояния, оговоренного в технической документации.

Гамма-процентный ресурс — ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число ( $\gamma$ ) процентов изделий данного типа.

Назначенный ресурс — наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия.

Гарантийная наработка — наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к изделию, при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

**Наработка на отказ** — среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами.

**Коэффициент технического использования** — отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации.

**Коэффициент готовности** — вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

**Срок службы** — календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала его применения до наступления предельного состояния.

**Срок сохраняемости** — календарная продолжительность хранения и (или) транспортировки изделия в заданных условиях, в течение и после которых сохраняется исправность.

Если изделие допускает возможность проведения ремонтов или технического обслуживания, предусмотренных в НТД, то оно называется *ремонтируемым изделием*. Ремонт предусматривает выполнение операций по восстановлению работоспособности изделия. Затраты времени на проведение таких операций называются *оперативным временем восстановления*.

*Оперативная продолжительность восстановления* — время проведения операций по восстановлению работоспособности изделия при выполнении работ несколькими исполнителями (в отличие от оперативного времени восстановления, которое определяется для каждого исполнителя).

В качестве характеристик при проведении работ по восстановлению применяются оперативная трудоемкость и оперативная стоимость исполнения.

Остальные понятия и термины будут вводиться по мере необходимости при изложении материала.

В зарубежной технической литературе применяются в основном аналогичные термины, хотя и несколько отличающиеся по содержанию [36], [66], [71], [75].

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)