

**Московский государственный технический  
университет  
им. Н.Э. Баумана**

**НАДЕЖНОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

1997

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Н.Э.БАУМАНА

НАДЕЖНОСТЬ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ  
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОИЗВОДСТВА

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им.Н.Э.Баумана  
в качестве учебного пособия по курсам  
"Эксплуатация инструментальных систем",  
"Основы научных исследований"*

Под редакцией А.Е.Древаля

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана

1997

Рецензенты: *Р.З.Диланян, Г.Т.Ершова*

Н17

Надежность инструментальных систем ракетно-космического производства / С.В. Грубый, Б.Д. Даниленко, А.Е. Древаль, А.В. Литвиненко; Под ред. А.В. Древаля. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. — 23 с., ил.

Приведены основные показатели, характеризующие надежность инструментальных систем, рассмотрены нормативные показатели стойкости, критерии затупления инструмента и законы распределения стойкости.

Для студентов 4 – 6-го курсов.  
Ил.б. Табл.2 Библиогр. 3 назв.

ББК 34.41

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997.

## 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И НАДЕЖНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Технико-экономические результаты работы машиностроительных предприятий в значительной мере зависят от эффективности технологического оборудования, надежности его элементов, и, в частности, режущего инструмента. Опыт эксплуатации технологических систем показывает, что режущий инструмент является наименее надежным их элементом. Рассеяние стойкости инструмента, непредвиденные отказы приводят к снижению производительности труда, возникновению брака в основном производстве, повышенному расходу инструмента, являются дестабилизирующими факторами при автоматизации механообработывающих производств. По данным различных исследователей, нецикловые простои металлорежущего оборудования, автоматических линий из-за смены и подналадки инструментов составляют от 16 до 33 % от фонда времени работы.

Физика отказов режущих инструментов чрезвычайно сложна и изучена недостаточно. С учетом специфики работы режущих инструментов, физико-механических свойств инструментальных материалов, конструктивных особенностей, определяющих прочностные характеристики инструмента, и конструктивных особенностей и материала детали правомочно говорить о надежности отдельных групп и видов инструментов.

Производство ракетно-космической техники отличается сложностью, в ряде случаев уникальностью изделий. Часто требуется изготовление крупных сложных деталей из дорогостоящих материалов. Для производства этого типа характерно широкое использование станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, гибких производственных систем с одновременным применением большого количества режущих инструментов. Новые изделия часто осваиваются в жестко ограниченные сроки.

В этих условиях внеплановый выход из строя или внезапный непрогнозируемый отказ одного из инструментов может привести к браку всего дорогостоящего изделия и необходимости переналадки всей инструментальной системы; следствием этого будут значительный экономический ущерб, дополнительные трудовые затраты, потери времени.

Поэтому в ракетно-космическом производстве особенно актуальны вопросы надежности режущего инструмента, диагностирования его состояния, прогнозирования выхода его из строя в целях предотвращения его неплановых отказов. Необходимо существенно изменить традиционные подходы к оценке работоспособности инструментов и развить новые на базе разработки физической теории резания металлов и разрушения инструментов с учетом стохастической природы протекания этих процессов. Наступление предельного состояния инструмента зависит от скорости изнашивания рабочих элементов инструментов и параметров режимов резания.

Надежность технического объекта, в том числе и режущего инструмента, обеспечивается на всех этапах его жизненного цикла: проектирование, изготовление, эксплуатация, списание. Каждый из этапов является составляющей понятия надежности. Надежность режущего инструмента, заложенная на этапах проектирования и изготовления, реализуется на этапе эксплуатации и оказывает решающее влияние на технико-экономические показатели механической обработки. Решение проблемы надежности режущих инструментов позволяет:

сократить простои технологического оборудования благодаря правильной организации планово-предупредительной замены режущих инструментов, формированию партий инструмента с однородными эксплуатационными свойствами, сокращению времени на подналадку и регулирование инструмента;

сократить брак в основном производстве вследствие прогнозируемых отказов инструментов;

обеспечить высокую оперативность при освоении новых изделий;

сократить расход режущего инструмента на основе более полного расходования его ресурса;

экономить рабочее время, сокращая время обслуживания технологического оборудования, увеличивая зону обслуживания, обеспечивая ритмичность работы.

В учебном пособии рассмотрена надежность режущих инструментов на этапе их эксплуатации.

## 2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Основные понятия надежности, относящиеся к техническим объектам, представленные в ГОСТ 27.002-83 "Надежность в технике. Термины и определения", применимы к режущему инструменту и процессам механической обработки. Это закреплено в ГОСТ 25751-83 "Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий".

Способность режущего инструмента сохранять работоспособными свои контактные поверхности и лезвия называется стойкостью инструмента, а время  $T$ , в течение которого это происходит, — периодом стойкости. Таким образом, принятый в резании металлов термин "период стойкости" означает продолжительность работы до отказа — потери инструментом работоспособности и соответствует термину "временная наработка". Период стойкости (чаще употребляют понятие "стойкость") связан с другими видами оценки наработки простыми алгебраическими соотношениями. Стойкость является наиболее широко распространенной и традиционной оценкой работоспособности инструментов.

Надежность — это обобщающее свойство, которое включает понятия безотказности, долговечности и др. Безотказность — свойство инструмента непрерывно сохранять работоспособность в течение требуемого времени, или наработки. Долговечность — свойство инструмента сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе переточки для восстановления работоспособности.

Использование понятий надежности имеет смысл только тогда, когда можно дать количественные оценки. Наиболее общими при обработке резанием являются понятия безотказности: вероятность безотказной работы, средняя наработка (стойкость) до отказа, гамма-процентная наработка (стойкость) до отказа; показатели долговечности: средний ресурс, гамма-процентный ресурс, назначенный ресурс, применяют и другие оценки. В теории резания металлов находит применение коэффициент вариации стойкости, т.е. отношение стойкости с заданной вероятностью  $T_{(p)}$  к средней стойкости  $T$ . Коэффициент вариации используется для относительной оценки инструментов различного качества и различных условий эксплуатации.

Наиболее полной характеристикой надежности является закон распределения времени работы инструмента до отказа, выраженный в дифференциальной форме в виде плотности вероятности или в интегральной форме — в виде функции распределения. Наличие таких распределений позволяет вычислить большинство показателей надежности. Часто используют статистические оценки, так как оперируют данными ограниченного объема. Показатели надежности оценивают по следующим зависимостям.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = \frac{n - n(t)}{n}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  — вероятность того, что в заданном интервале времени  $t = T$  невозможен отказ инструмента. Значение  $P(t)$ , каковой вероятности, может находиться в пределах  $0 < P(t) < 1$ .

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  и вероятность отказа  $F(t)$  образуют полную группу событий, поэтому  $P(t) + F(t) = 1$ ;  $n$  — объем выборки инструмента или общее число рассматриваемых периодов стойкости;  $n(t)$  — число инструментов, отказавших до достижения времени  $t$ .

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{\Delta t [n - n(t)]}, \quad (2)$$

где  $n(t + \Delta t)$  — количество инструментов, отказавших в интервале времени  $t + \Delta t$ ;  $\Delta t$  — интервал времени.

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  — это вероятность отказа в единицу времени  $t$  при условии, что для этого времени отказ не возник.

Плотность вероятности отказов

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{n \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

где  $\Delta n(t)$  — число инструментов, отказавших в интервале времени  $\Delta t$ .

Плотность вероятности отказов  $f(t)$  — это вероятность отказа, приходящаяся на единицу времени.

Средний период стойкости  $n$

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^n T_i / n, \quad (4)$$

где  $T_i$  — стойкость  $i$ -го инструмента;  $n$  — число испытанных инструментов.

При оценке стойкости режущего инструмента наряду со средним значением важную роль играют показатели ее стабильности. Стабильность стойкости обычно характеризуется ее средним квадратичным отклонением  $\sigma$  и коэффициентом вариации  $\theta$ .

Среднее квадратичное отклонение определяют по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T_i - T_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (5)$$

коэффициент вариации — по формуле

$$\theta = \sigma / T_{cp}. \quad (6)$$

Для обеспечения заданного уровня безотказной работы инструмента определяют гамма-процентный период стойкости (т.е. время работы инструмента, в течение которого он не достигнет отказа) с заданной вероятностью  $\gamma$  по формуле

$$T_{\gamma} = T_{cp} (1 - U_p \cdot v), \quad (7)$$

где  $U_p$  — квантиль нормального распределения, определяемый по таблице интеграла вероятностей (например, для  $\gamma = 0,9$   $U_p = 1,282$ ; для  $\gamma = 0,95$   $U_p = 1,64588$ ;  $v$  — коэффициент вариации).

Гамма-процентный период стойкости можно использовать при определении времени регламентированной смены инструментов. Недостаточность оценки стойкости только по ее среднему значению можно проиллюстрировать результатами сравнительных испытаний двух партий концевых фрез различных заводов-изготовителей и двух партий сверл с разными параметрами (табл. 1).

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний двух партий фрез и сверл

Инструмент	Партия	Результаты испытаний		
		$T_{cp}$ , мин	$v$	$T_{\gamma} = T_{0,9}$ , мин
Концевые фрезы	1	18,0	0,24	12,4
	2	18,0	0,64	7,4
Сверла $\varnothing 4$ мм	1	53,4	0,41	26,0
	2	183,4	0,11	158,0

Как видно из табл. 1, объективную оценку качества инструментов можно дать только после расчета гамма-процентной стойкости.

Оценить существенность различия в средних значениях стойкости двух партий инструмента можно с учетом результатов испытаний по критерию Стьюдента (если  $t > t_{кр}$ , то различие существенно):

для  $n < 20$

$$t = \frac{|T_{cp1} - T_{cp2}|}{\sqrt{n_1 \cdot \sigma_1^2 + n_2 \cdot \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}; \quad (8)$$

для  $n > 20$

$$t = \frac{|T_{cp1} - T_{cp2}|}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}}, \quad (9)$$

где  $n$ ,  $T_{cp}$ ,  $\sigma^2$  — соответственно число инструментов, средний период и дисперсия стойкости в каждой партии;  $t$  — расчетное значение критерия Стьюдента;  $t_{кр}$  — критическое (табличное) значение критерия Стьюдента.

Формулы (1) — (9) действительны для закона Гаусса или близкого к нему закона распределения случайных величин. Строгую проверку на соответствие определенному закону распределения осуществляют по специальным критериям согласия. Вместе с тем, экспериментальные наблюдения показывают, что закон распределения стойкости при удовлетворительном качестве инструмента и нормальных условиях эксплуатации согласуется с законом Гаусса.

### 3. ОТКАЗЫ ИНСТРУМЕНТОВ, КРИТЕРИИ ОТКАЗОВ, НОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТОЙКОСТИ

Отказ инструмента — это потеря им работоспособности. Существует несколько форм проявления отказов, которые определяются требованиями нормативной технической документации. Достижение инструментом определенной величины износа, превышение которой приведет к механическому его разрушению или к разупрочнению режущих лезвий, при которых дальнейшая эксплуатация инструмента исключается, соответствует функциональному отказу. Другой случай: режущий инструмент не обеспечивает требуемых показателей точности, шероховатости и других параметров качества обработанных поверхностей. Это событие соответствует параметрическому отказу, при котором лезвия не теряют способности удалять припуск. Реже к инструментам предъявляют следующие требования: по ограничению превышения определенного уровня энергозатрат, температуры обработки и показателей вибрации; по достижению величины износа, определяемой системой регулировки на размер и системой восстановления режущих свойств; по отсутствию заусенцев и др.

Возникновение отказов обусловлено физическими процессами накопления повреждений инструмента при его эксплуатации, проявляющимися в виде износа рабочих поверхностей, изменений их шероховатости, роста микротрещин, скалывания режущих лезвий, диффузии легирующих элементов и др. Наиболее часто наблюдается износ рабочих поверхностей, что является естественным проявлением физических свойств контактирующих и взаимно движущихся поверхностей. По мере износа инструмента наступает такой момент, когда его работа должна быть прекращена, а сам инструмент направлен на восстановление. Ве-

личину износа, при которой наступает это событие, принимают за критерий затупления, который в соответствии с ГОСТ 25751-83 является частным случаем критерия отказа режущего инструмента.

Износ инструмента может оцениваться массой, объемом инструментального материала, удаленного вследствие процесса изнашивания, или линейной величиной изношенных участков, которая получила название критерия затупления. Этот критерий нашел отражение в нормативах режимов резания.

В зависимости от вида инструмента в качестве критерия затупления могут быть использованы следующие параметры [2]:

для резцов, фрез — величина площадки износа по задним поверхностям, глубина лунки на передней поверхности;

для сверл — величина площадки износа по задней поверхности на некотором расстоянии от уголка, величина площадки износа по уголку, величина площадки износа по поперечному лезвию (для мелкоразмерных сверл);

для разверток — величина площадки износа по задней поверхности, величина износа калибрующей ленточки на участке, примыкающем к уголку или по всей длине, размерный износ по диаметру, радиус округления кромки;

для резбонарезного инструмента: для резцов — величина площадки износа по задней поверхности у вершины; для метчиков и плашек — величина площадки износа по задней поверхности режущих профилей на участке перехода режущей части в калибрующую; для резбонарезных головок — величина площадки износа по задней поверхности гребенок;

для протяжек — величина площадки износа по задней поверхности зубьев.

Стойкость является наиболее часто встречающейся оценкой наработки режущего инструмента. Одновременно наработка может быть выражена массой или объемом снятого материала, длиной пути резания, площадью обработанной поверхности или числом обработанных заготовок. Стойкость связана с другими видами оценки наработки простыми алгебраическими соотношениями. Так, количественными оценками эксплуатационного ресурса инструмента могут быть следующие:

суммарная длина рабочего пути резания каждого лезвия инструмента, выраженная в метрах, при постоянном значении глубины резания и подачи:  $L = v \cdot T$ , где  $v$  — скорость резания;  $T$  — стойкость, мин;

суммарная площадь  $F$  (мм<sup>2</sup>) поверхности, обработанной всеми лезвиями инструмента:  $F = v \cdot T \cdot s \cdot 1000$ , где  $s$  — подача при постоянной глубине резания, мм/об;

суммарный объем  $Q$  (мм<sup>3</sup>) срезанного и превращенного в стружку металла:  $Q = v \cdot T \cdot s \cdot 1000$ .

Значение каждого из этих критериев полезной работы инструмента прямо пропорционально числу заготовок, обработанных за период его стойкости. Использование каждого из этих критериев оценки эксплуатационного ресурса инструмента позволяет выработать нормативные рекомендации, в соответствии с которыми изношенный инструмент можно заменить после обработки определенного числа однотипных заготовок.

В зависимости от величин, выражающих наработку режущего инструмента, различают наработки: временную, массовую, объемную, путевую, поверхностную, штучную. Временная наработка между отказами может выражаться временем резания, машинным временем, продолжительностью цикла работы оборудования. Период стойкости является частным случаем временной наработки до отказа; под периодом стойкости режущего инструмента понимается время резания новым или восстановленным инструментом от начала резания до отказа. В табл. 2 приведены нормативные значения стойкости различных видов инструмента; следует отметить общую тенденцию увеличения периода стойкости с увеличением конструктивной сложности инструмента.

Таблица 2

Нормативные значения периода стойкости

Вид инструмента	Стойкость $T$ , мин	Примечание
Резцы общего назначения	30-60	Зависит от диаметра
Фасонные резцы	120	
Сверла	15-170	
Зенкеры	30-100	
Развертки	20-200	
Фрезы: торцевые общего назначения	120-420 60-240	
Метчики, плашки	90	
Резьбовые головки	150-180	
Фрезы резьбовые	240-270	
Фрезы червячные модульные	480	
Долбяки зуборезные	240	Чистовые
	400	Черновые
Фрезы червячные шлицевые	240	Чистовые
	600	Черновые
Фрезы дисковые модульные	300	Чистовые
	480	" "

Режущие инструменты могут быть разбиты на четыре группы по основным признакам их эксплуатации [1]: 1 — инструмент об-

щего назначения, работающий в условиях значительной неопределенности параметров процесса резания; 2 — инструмент для автоматизированного производства; 3 — инструмент для операций чистовой обработки; 4 — инструмент для прецизионной обработки и случаев, когда поломка инструмента приводит к неисправимому браку заготовки.

Для инструмента первой группы ошибки в определении показателя стойкости не приводят к значительным экономическим потерям, поэтому нормируют средний период стойкости.

Инструмент второй группы эксплуатируется на оборудовании, где производится его принудительная замена, как правило, с определенным запасом относительно предельных значений стойкости. В этом случае нормируют либо средний период стойкости, либо гамма-процентный период стойкости.

К точности оценок инструментов третьей и четвертой групп предъявляют высокие требования как к более дорогостоящим и с учетом того, что отказ инструмента при обработке заготовки приводит к браку и значительным экономическим потерям. Для этих инструментов назначают гамма-процентную стойкость либо рассчитывают вероятность того, что стойкость будет равна или больше некоторого значения  $T_0$ , по результатам производственных испытаний:

$$P(t) = P\{T > T_0\} = 1 - m(t)/n,$$

где  $m(t)$  — число инструментов, отказавших за время  $T_0$ ,  $n$  — общее число испытанных инструментов.

#### 4. ФОРМИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Для описания распределения наработки инструмента наиболее часто применяют законы: нормальный (Гаусса), нормально-логарифмический, Вейбулла-Гнеденко, гамма-распределения, экспоненциальный и др. Экспериментальные проверки распределения стойкости, выполненные для обоснования закона распределения на базе выборок большого объема для различных видов инструментов, показали, что распределение стойкости может быть описано различными теоретическими законами в зависимости от условий эксплуатации и качества инструмента. При этом один и тот же массив статистических данных может быть удовлетворительно описан несколькими законами распределения. Это значит, что выбор закона распределения должен базироваться на анализе характера физических явлений процесса и в какой-то степени — на удобстве математического аппарата.

#### 4.1. Схемы формирования отказов

Рассмотрим схемы формирования отказов режущего инструмента.

**Схема внезапных отказов.** На рис. 1 изображен график изменения момента резания при сверлении отверстия. Характерно

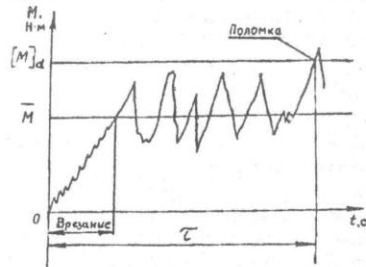


Рис.1. Изменение момента сверления

наличие отдельных "пиков" нагрузки. Отказ сверла происходит, когда текущее значение момента резания  $M_i$  превышает допустимый уровень момента  $[M]_d$ , определяемый прочностью сверла, т.е.  $M_i > [M]_d$ . Вследствие случайного изменения нагрузки на сверло (допустим из-за дефектов структуры обрабатываемого материала) время возникновения отказа  $\tau$  также будет случайной величиной.

Основным признаком

внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения в течение заданного периода времени от  $t_1$  до  $t_2$  (здесь  $t_1$  — длительность предыдущей работы инструмента). Выход из строя происходит, как правило, внезапно, без предшествующих симптомов разрушения (потери работоспособности). Ярким аналогичным примером образования отказа может служить прокол шины автомобиля. Он происходит из-за попадания острого предмета и не зависит от степени изношенности шины. Вероятность возникновения прокола одинакова как для новой, так и для изношенной шины.

**Схема накапливающихся повреждений (постепенные — износные отказы).** Эти отказы возникают в результате постепенного накопления повреждений. К этому виду относится большинство отказов машин и деталей. Они связаны с процессами износа, коррозии, усталости и ползучести материалов. Для режущего инструмента наиболее распространенным является изнашивание лезвий и рабочих поверхностей. Для рабочих элементов инструмента заранее устанавливают допустимые пределы износа, выход за которые квалифицируется как отказ.

Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения  $F(t)$  в течение заданного периода

времени от  $t_1$  до  $t_2$  зависит от предыдущей работы инструмента  $t_1$ . Чем больше эксплуатировался инструмент, тем выше вероятность его возникновения, т.е.  $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$ ,  $t_2 > t_1$ .

Постепенное накопление повреждений инструмента иллюстрирует кривая износа  $h = f(t)$  на рис. 2. В общем случае на кривой износа (кривая *a*) можно выделить участок приработки (интенсивность изнашивания уменьшается в сравнении с первоначальной)  $0 - 1$ , участок "нормального" установившегося изнашивания  $1 - 2$  и участок "катастрофического" изнашивания (интенсивность резко возрастает)  $2 - 3$ . Зависимость, отраженная кривой *a*, носит самый общий характер и является типовой не только для режущего инструмента. Такой вид зависимости часто встречается в технике.

Под влиянием условий эксплуатации и качества инструмента общий вид кривой износа может трансформироваться. Период приработки может существенно сократиться и практически стать равным нулю — кривая *b*, участок нормального изнашивания может иметь вид выпуклой или вогнутой кривой — кривая *в*. Общим является то, что кривые износа — это во всех случаях возрастающие функции. Они отражают физические процессы изнашивания и являются основой для анализа процессов формирования отказов инструмента и построения их математических моделей.

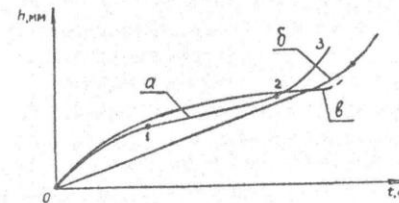


Рис.2. Характерный вид кривых износа режущего инструмента

**Схема совместного проявления внезапного и постепенного отказов.** Постепенное накапливание повреждений (износа) может быть не прямой причиной отказа, а косвенной. Так, износ из-за изменения условий контактирования детали и режущего инструмента приводит к общему возрастанию силы резания и приближению к допустимой прочности инструмента. При неблагоприятных условиях обработки, например, при наличии твердых включений в обрабатываемом материале, происходит локальное возрастание нагрузки от уровня, уже приближенного к допустимому и, как следствие, — разрушение инструмента.

Здесь не достигается установленный предел изнашивания (критерий затупления), накопление повреждений приводит лишь к росту вероятности отказа. Для этого случая характерно сочетание постепенного накопления повреждений со скачкообразным изменением состояния инструмента.

#### 4.2. Модели отказов

Рассмотрим математическое описание предложенных схем отказов, не приводя детальных математических выкладок, которые представлены, например в [3].

**Внезапные отказы.** Для математического описания времени безотказной работы инструментов при внезапных отказах применимо экспоненциальное распределение.

Вероятность безотказной работы определяют по зависимости

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (10)$$

где  $\lambda = \text{const}$  — вероятность возникновения отказа в единицу времени при условии, что до этого момента отказ не возникал.

Функция распределения отказов имеет вид  $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ , а плотность вероятности  $f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t)$ .

На рис. 3 приведены графики изменения плотности вероятности  $f(t)$  при различных значениях параметра  $\lambda$ .

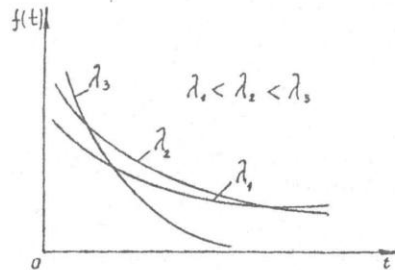


Рис.3. Плотность экспоненциального распределения для различных значений параметра  $\lambda$

Средняя наработка до отказа  $T_{\text{ср}} = 1/\lambda$ , т.е.

$\lambda$  есть величина, обратная среднему времени безотказной работы, и имеет размерность, обратную размерности времени работы [1/ч].

Дисперсия наработки определяется зависимостью  $\sigma^2(t) = 1/\lambda^2$ , а коэффициент вариации  $v(t) = \sigma(t)/T_{\text{ср}} = 1$ .

Вероятность безотказной работы может быть записана в следующем виде:

$$P(t) = \exp(-t/T_{\text{ср}}).$$

Необходимо подчеркнуть два важных момента, характерных для рассматриваемой схемы возникновения отказов:

1. Уровень предельно допустимой нагрузки  $[M]_d$  (см. рис. 1) остается постоянным в течение всего времени эксплуатации инструмента.

2. Отказ возникает не как следствие постепенного изменения внутреннего состояния инструмента, а лишь как результат внешнего случайного воздействия, превышающего допустимое.

Отсюда следствия экспоненциального распределения времени безотказной работы:

1. Нет смысла прибегать к профилактическим работам: предварительной замене инструментов или ремонту (заточке).

2. Повышение надежности возможно либо в результате конструктивного улучшения инструмента: использование нового, более прочного инструментального материала, оптимальных геометрических параметров и т.п., либо вследствие снижения нагрузки на инструмент.

3. Рекомендуется создание диагностических систем, быстро реагирующих на отказ инструментов и приводящих технологическую систему в безопасное состояние (выключение привода и отвод инструмента из зоны обработки).

**Постепенные отказы.** Рассмотрим модель формирования отказа для случая, когда кривая износа имеет вид кривой б на рис. 2, т.е. отсутствует участок приработки и зависимость износа инструмента от времени работы имеет линейный характер:  $h = \gamma \cdot t$ , где  $\gamma$  — скорость протекания изнашивания, является случайной величиной.

Величина  $\gamma$  зависит от большого числа случайных факторов (нагрузки, температуры, условий эксплуатации, качества инструмента, свойств материала заготовки, состояния технологической системы). Поэтому наиболее характерен случай, когда она подчинена нормальному закону распределения:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sigma_g (2\pi)^{0.5}} e^{-(\gamma - \gamma_{\text{ср}})^2 / (2\sigma_g^2)}, \quad (11)$$

где  $f(\gamma)$  — плотность вероятности;  $\gamma_{\text{ср}}$  — среднее значение скорости изнашивания;  $\sigma_g$  — среднее квадратичное отклонение скорости изнашивания;  $\delta = \sigma_g / \gamma_{\text{ср}}$  — коэффициент вариации скорости изнашивания.

Предельно допустимое значение износа  $[h]_d$  установлено предварительно из условия правильности функционирования инструмента. При  $h_i = [h]_d$  наступает предельное состояние, которое и

определяет наработку инструмента до отказа:  $t = T$ . Нарботка в этом случае является функцией случайного аргумента  $\gamma$ , т.е.  $T = \varphi(\gamma) = X_{\max}/\gamma$ . Задача сводится к определению плотности распределения  $f(t)$  по заданной функции  $f(\gamma)$ . Схема, отражающая данную модель, представлена на рис. 4.

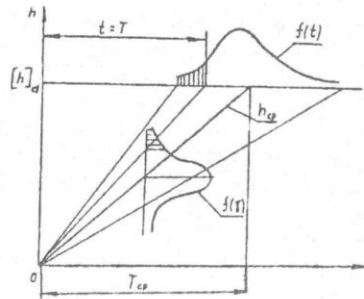


Рис.4. Схема формирования постепенного отказа

Для функции случайного аргумента применяют формулу

$$f(t=T) = f[\omega(T) |\omega'(T)|], \quad (12)$$

где  $\omega(T)$  — функция, обратная  $T = f(\gamma)$ , т.е.  $\omega(T) = [h]_d/T$ ;  $\omega'(t)$  — производная обратной функции:  $\omega' = -[h]_d/T^2$ .

После подстановки имеем плотность вероятности наработки:

$$f(T) = \frac{T_{cp}}{\sigma_g (2\pi)^{0.5} \cdot T^2} e^{-(T-T_{cp})^2 / (2\delta^2 T^2)}, \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы может быть определена по зависимости

$$P(T) = 0.5 + \Phi\left(\frac{[h]_d - \gamma_{cp} T}{T \cdot \sigma_g}\right), \quad (14)$$

где  $\Phi$  — нормированная функция Лапласа  $0 \leq \Phi \leq 0.5$ .

Математические преобразования для получения зависимости вероятности безотказной работы представлены в [3].

В более полной схеме потери инструментом работоспособности учитывается и рассеяние его параметров. Для режущего инструмента это — рассеяние приработки (рис. 5). В этом случае

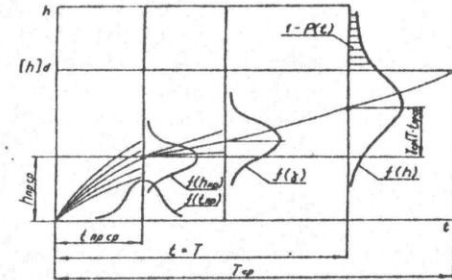


Рис.5. Схема формирования постепенного отказа с рассеянием параметров инструмента

участок нормального изнашивания 1-2 (см. рис. 2) можно описать уравнением  $h = h_{np} + \gamma(t - t_{np\text{cp}})$ , где  $h_{np}$  — начальный параметр — приработочный износ, который является случайной величиной (экспериментальные проверки показали, что его распределение удовлетворительно описывается законом Гаусса);  $t_{np\text{cp}}$  — среднее время приработки (время приработки является также случайной величиной, распределение которой удовлетворительно согласуется с законом Гаусса). Эксперименты показали незначительное ее рассеяние, поэтому с точностью, допустимой в инженерных расчетах, принимаем значение  $t_{np}$  постоянным, равным среднему значению  $t_{np\text{cp}}$ .

Время работы является функцией двух независимых случайных аргументов  $h_{np}$  и

$$T = \frac{[h]_d - h_{np}}{\gamma} + t_{np\text{cp}}. \quad (15)$$

Получение зависимости распределения  $f(t)$  при двух случайных аргументах является трудоемкой математической задачей. Однако, если случайные аргументы распределены по закону Гаусса, то износ для каждого значения  $t=T$  будет распределен по тому же закону с параметрами: математическое ожидание

$$h_{cp} = h_{np\ cp} + \gamma_{cp} (T - t_{np\ cp});$$

среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_h = [\sigma_{h\ np}^2 + \sigma_g^2 (T - t_{np\ cp})^2]^{0,5}, \quad (16)$$

где  $h_{np\ cp}$  — математическое ожидание и  $\sigma_{h\ np}$  — среднее квадратичное отклонение приработочного износа.

После ряда преобразований получают зависимость вероятности безотказной работы:

$$P(T) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{[h]_d - h_{np\ cp} - \gamma_{cp} (t - t_{np\ cp})}{[\sigma_{h\ np}^2 + \sigma_g^2 (t - t_{np\ cp})^2]^{0,5}} \right]. \quad (17)$$

Данная зависимость является более общей и при  $h_{np\ cp} = 0$ ,  $\sigma_{h\ np} = 0$ ,  $t_{np\ cp} = 0$  превращается в формулу (14). Эту же формулу можно использовать и при нелинейном протекании процесса изнашивания, т.е. когда математическое ожидание  $\gamma_{cp}(t)$ , а также дисперсия  $[\sigma_g(t)]^2$  являются функцией времени.

**Совместное проявление внезапных и постепенных отказов.** При совместном действии постепенных и внезапных отказов значение вероятности  $P(t)$  может быть подсчитано по теореме умножения вероятностей, так как событие — безотказность работы инструмента за время  $t$  заключается в выполнении двух условий: безотказности от износных повреждений  $P_n(t)$  и безотказности от внезапных выходов из строя  $P_b(t)$ . Эти события независимы, следовательно  $P(t) = P_n(t) \cdot P_b(t)$ .

Таким образом, если износные отказы подчиняются закону распределения (17), а внезапные — экспоненциальному (10), то вероятность безотказной работы определяется зависимостью

$$P(T) = \left[ 0,5 + \Phi \left[ \frac{[h]_d - h_{np\ cp} - \gamma_{cp} (t - t_{np\ cp})}{[\sigma_{h\ np}^2 + \sigma_g^2 (t - t_{np\ cp})^2]^{0,5}} \right] \right] \exp(-\lambda t). \quad (18)$$

Рассмотрим пример. Выполнены испытания партии объемом  $n = 100$  шт. машинно-ручных метчиков М12Н1 из Р18 при нарезании резьбы в сквозном отверстии глубиной 21,5 мм, сталь 35, твердость НВ201...229, СОЖ 3%-ный раствор эмульсии ЭТ-2. Испытания проводили до возникновения функционального отказа, проявляющегося в поломках инструмента или возникновении

крупных сколов и выкрашиваний. При испытаниях периодически измеряли износ задних поверхностей и строили кривые износа для каждого метчика. Результаты испытаний представлены на рис. 6.

Испытания показали, что главной причиной, приводящей к функциональным отказам, являются повреждения в виде износа калибрующих и режущих профилей. При приближении  $h_i$  к

$[h]_d = 0,125 d = 1,5$  мм наблюдается наибольший процент разрушения инструмента.

Одновременно разрушения и обширные сколы на метчиках наблюдаются на участке нормального износа без предшествующих микросколов. Возникают такие отказы внезапно, и частота их появления прибли-

тельно постоянна. Это возможно, если в процессе резбонарезания возникают случайные силовые воздействия, которые превышают прочность метчиков и их рабочих элементов. Проверка согласования распределения внезапных отказов с экспоненциальным распределением, выполненная с использованием вероятностной сетки, подтвердила хорошее согласование распределения отказов по опытным данным с экспоненциальным распределением. Условие  $\lambda = \text{const}$  удовлетворительно соблюдается только в пределах участка нормального износа метчиков (до  $h = 1,5$  мм).

Таким образом, анализ показывает, что совместно действуют постепенные и внезапные отказы. Вероятность безотказной работы может быть определена по зависимости (18).

В данном пособии допущены некоторые упрощения и ряд положений приняты без строгих доказательств. Авторы считают, что это будет способствовать лучшему усвоению основных идей теории надежности. Для определения показателей надежности по указанным моделям необходимо установить ряд параметров: допустимую величину износа  $[h]_d$ , среднюю скорость (интенсив-

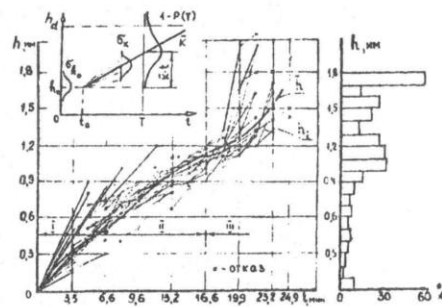


Рис.6. Зависимость реализации износа задних поверхностей последнего режущего профиля метчиков М12Н1 и диаграмма функциональных отказов в зависимости от износа задних поверхностей

ность) изнашивания  $\gamma_{\text{ср}}$  и среднее квадратичное отклонение скорости изнашивания  $\sigma_{\gamma}$ ; характеристики начального рассеяния  $h_{\text{пр ср}}$  и  $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $t_{\text{пр ср}}$  параметр  $\lambda$  и др. Значения этих параметров зависят от условий эксплуатации инструментов и их конструктивных особенностей. Обобщенных зависимостей для установления значений этих параметров в общем не существует. Исключение составляют отдельные виды обработки ограниченных групп инструментальных материалов. Эти параметры выявляют в основном экспериментальным путем на стадии подготовки производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. М.: Машиностроение, 1985. 130 с.
2. Методики экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки / Под ред. Г.И. Грановского. М.: НИИмаш, 1982. 159 с.
3. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 598 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Эффективность механической обработки и надежность режущих инструментов .....	3
2. Показатели надежности инструментальных систем .....	4
3. Отказы инструментов, критерии отказов, нормативные показатели стойкости .....	8
4. Формирование отказов режущих инструментов .....	11
4.1. Схемы формирования отказов .....	12
4.2. Модели отказов .....	14
Список литературы .....	21

Редакция заказной литературы

**Сергей Витальевич Грубый**  
**Борис Дмитриевич Даниленко**  
**Алексей Евгеньевич Древаль**  
**Анатолий Висильевич Литвиненко**

**Надежность инструментальных систем  
ракетно-космического производства**

Заведующая редакцией *Н.Г.Ковалевская*  
Редактор *Е.К.Кошелева*  
Корректор *М.А.Василевская*

Подписано в печать 10.11.97. Формат 60×84/16. Бумага тип. №2. Печ.л. 1,5.  
Усл.печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,36. Тираж 100 экз. Изд. №38. Заказ № **67С**

Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана.  
Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана  
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.