

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.62-52:62-192

В. А. Полетаев, И. В. Чичерин

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Технологический процесс (ТП) изготовления изделий должен с наименьшими временными и материальными затратами обеспечить требуемый уровень качества машин. ТП оказывает непосредственное влияние на показатели качества изготавливаемого изделия, в том числе и на надежность, хотя эти связи сложны и многоэтапны. Анализ эксплуатационной надежности различных изделий показывает, что 25-40 % их отказов вызвано дефектами производства [1, 2]. Однако вопросы взаимосвязи надежности изделия с качеством ТП решены недостаточно. Анализ исследований и практических разработок, которые ведутся в области повышения надежности изделий за счет технологии, показывает, что не всегда имеется четкое представление о том круге вопросов, которые должна решать технология [1, 2, 3].

Статистика отказов, связанных с несовершенством ТП позволяет выделить три группы причин [1, 3]. Первая группа связана с несовершенством технологической документации, с недостатками методов контроля и испытания на надежность готового изделия. Вторая группа причин возникновения отказов связана с остаточным и побочным явлениями, порождаемыми ТП. Третья группа связана с недостаточной надежностью самого ТП.

В связи с этим при решении вопроса о повышении эксплуатационной надежности машин определенную актуальность приобретает исследование качества самих ТП, и в первую очередь, управления их надежностью. ТП, особенно в автоматизированном производстве, относится к сложным большим системам.

Специфические особенности ТП, с одной стороны, затрудняют решение обеспечения требуемого уровня надежности, а с другой стороны, обладают целым рядом положительных свойств.

Трудности связаны с большой сложностью технологических систем, наличием многочисленных и разнообразных взаимосвязей, характеризующимися стохастический природой, с высокими требованиями к надежности.

С другой стороны, возможность структурного и параметрического изменения технологической системы (ТС) и ее элементов, введение новых операций, изменение их последовательности, введе-

ние дополнительного контроля, изменение требований к технологическим операциям, изменение технологических параметров, резервирование элементов системы и планирование профилактических ремонтов, возможность адаптации технологических систем облегчает задачу обеспечения высокой надежности технологических систем.

Одной из характеристик особенностей ТП является взаимозависимости его качественных и количественных показателей. Нередко эти две характеристики ТП вступают в противоречие – повышение производительности процесса может привести к снижению качества производимой продукции и наоборот. Поэтому надежность ТП должна быть обеспечена по обоим показателям.

Под надежностью технологической системы понимают ее способность выполнять заданные функции, сохраняя показатели качества и ритм выпуска годной продукции в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Отказы технологических систем могут быть постепенными и внезапными. Постепенные отказы связаны с процессом износа технологического оборудования, технических средств системы управления, инструмента, оснастки и средств контроля, с температурными деформациями и т.п. Внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров системы (например, вызваться ошибками людей, быть следствием дефектов в заготовках и инструментах и т.п.).

Надежность ТП должна осуществляться только по тем параметрам и показателям качества, уровень которых зависит от технологии изготовления.

Цели и задачи исследования надежности технологических систем могут быть подразделены на три группы.

Первая группа – определение надежности действующих ТП и ТО, установление причин недостаточной надежности, разработка мероприятий по устранению причин отказов. Они полностью определены государственными стандартами и подробно рассмотрены в многочисленной литературе [1, 2, 3]. Вторая группа задач характерна для технологической подготовки производства – это вы-

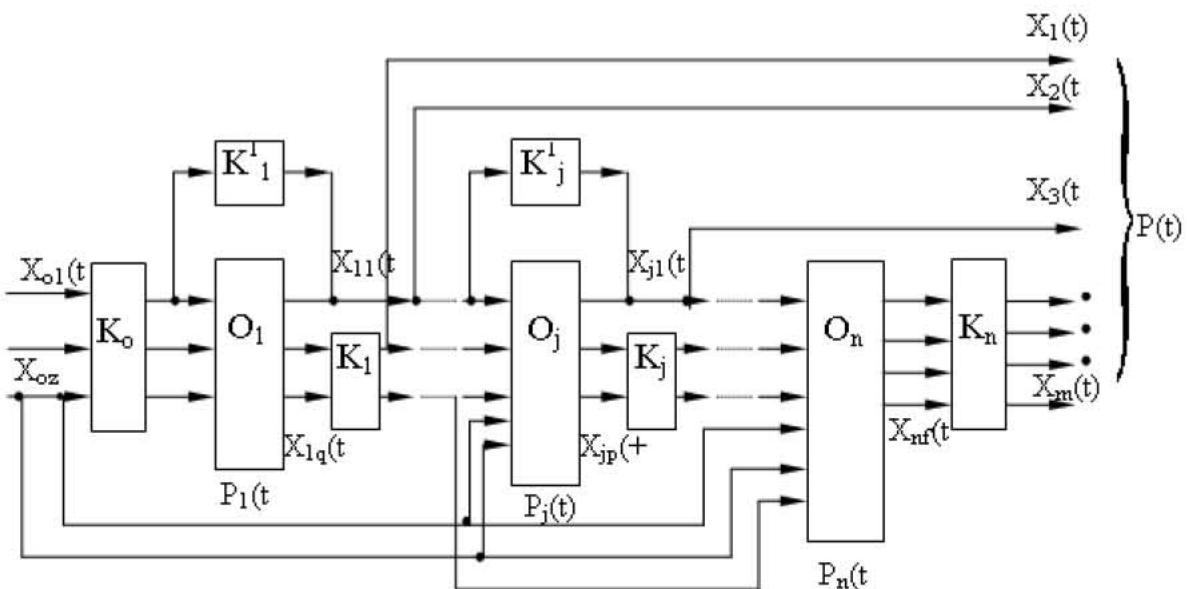


Рис. 1. Схема формирования показателей надежности технологической системы технологического процесса

бор наилучшего варианта ТС с позиции обеспечения требуемой надежности, оптимизация надежности ТС, метода и объема контрольных операций, резервирования восстанавливаемых систем, планирования профилактических ремонтов, разработка оптимальных технологических процессов. Третья группа задач – обеспечение требуемой надежности ТС на этапе ее эксплуатации, то есть при изготовлении изделий.

Следовательно, при технологической подготовке производства актуальной становится проблема управления надежностью ТС.

Процесс управления надежностью немыслим без знания факторов, влияющих на потерю работоспособности системы, без раскрытия природы отказов, без изучения физико-химических процессов в технологической системе, приводящих к потере ее работоспособности. Анализ процесса потери системой работоспособности целесообразно проводить на математической модели надежности.

Для этой цели необходимо разработать процесс формирования выходных параметров качества и производительности системы.

Для обеспечения показателей надежности необходимо управлять процессом их формирования, направленно воздействуя на его отдельные этапы и контролируя ход процесса (рис. 1).

В итоге технологического процесса, состоящего из  $n$  операций, должен быть обеспечен поиск  $m$  параметров  $x_1, x_2, \dots, x_m$  в пределах допуска. Вероятность  $P(t)$  выхода любого из параметров за пределы допуска в течение заданного периода  $t = T$  определит безотказность данной ТС ТП.

$$P(t) = \sum_{i=1}^m P_{x_i}(t). \quad (1)$$

В свою очередь вероятность  $P_{x_i}$  выхода любого из параметров  $x_i$  за пределы допуска в течение заданного периода  $t = T$  зависит от вероятности безотказной работы каждой ТС технологической операции ( $O_j$ ) по рассматриваемому параметру  $x_i$ .

$$P_{x_i} = \sum_{j=1}^n P_{x_{ji}}, \quad (2)$$

если выходные параметры  $x_{ji}$  подсистемы  $O_j$  независимы.

Таким образом, надежность ТС ТП зависит от надежности подсистем, осуществляющих технологические операции (ТО), структура системы, определяющей взаимосвязь и последовательность выполнения ТО. Контрольные операции (КО) с позиции схемной надежности играют роль резервных элементов и существенно повышают надежность всего ТП, если иметь в виду появление бракованных деталей. Но и КО характеризуются вероятностью  $P_{kj}$ , тогда для оценки вероятности безотказного осуществления ТО по параметру  $x_i$  можно воспользоваться зависимостью

$$P_{x_{ji}} = \sum_{j=1}^n \left[ 1 - \left( 1 - P_{x_{ji}} \right) \left( 1 - P_{k_j} \right) \right] \quad (3)$$

а для всего ТП

$$P(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ 1 - \left( 1 - P_{x_{ji}} \right) \left( 1 - P_{k_j} \right) \right]. \quad (4)$$

Однако данная зависимость не дает реальной картины надежности ТП, так как в действительности ТП может оказаться абсолютно малонадеж-

ным и неэффективным из-за большого количества отбракованных деталей по всей цепочке ТП. В результате возрастают техническая себестоимость изготовления изделий.

Значительно повышают надежность ТП введение систем активного контроля и автоматического управления качеством изделий, хотя и они характеризуются соответствующей вероятностью. В этом случае зависимость (4) приобретает реальное содержание.

Для оценки надежности  $j$ -ой технологической подсистемы технологической операции, но по параметру  $x_{jz}$ , примем схему потери работоспособности подсистемы при заданной длительности работы, рассмотренную в [1]. Схема представляет собой модель отказа подсистемы, учитывающая процессы различной скорости – быстропротекающие, средней скорости и медленно протекающие процессы.

Если обобщенное мгновенное распределение параметра  $x_{jz}$  подчиняется нормальному закону, что характерно для технологических операций, выполняемых на предварительно настроенных станках [1], то вероятность безотказной работы технологической системы в момент  $t$  [1]:

$$\begin{aligned} P_{x_{jz}}(t) &= 0,5 + \Phi[\beta] - \Phi[\alpha], \quad (5) \\ \alpha &= \frac{x_{\min} - a_o - \gamma_{-p}(t)t - a_c(t)}{\sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_j^2(t)t^2 + \sigma_c^2(t)}}, \\ \beta &= \frac{x_{\max} - a_o - \gamma_{-p}(t)t - a_c(t)}{\sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_j^2(t)t^2 + \sigma_c^2(t)}}, \end{aligned}$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное значение параметра  $x_{jz}$ ;

$a_o$  – математическое ожидание величины  $x_{jz}$  в начальный момент времени;

$\sigma_o$  – среднеквадратическое отклонение от центра группирования;

$\gamma_{-p}$  – среднее значение (математическое ожидание) скорости изменения параметра  $x_{jz}$ ;

$\sigma_j$  – среднеквадратическое отклонение скорости изменения параметра  $x_{jz}$ ;

$a_c(t)$  – математическое ожидание мгновенного распределения в момент  $t$ , характеризующее изменение во времени числа и характеристик рассеивания независимых случайных слагаемых;

$\sigma_c$  – среднее квадратическое отклонение, вызванное независимыми случайными факторами;

$\Phi(z)$  – функция Лапласа.

Рассмотренная схема потери работоспособности соответствует случаю, когда подсистема функционирует в течение заданного периода, то есть все периоды непрерывной работы  $T_o$  одинаковы и заранее установлены.

Данный метод дает возможность назначать

время для плановых мероприятий по техническому обслуживанию. Однако, в первый период работы имеется запас надежности и возможности подсистемы полностью не используются.

Более совершенным является непрерывная работа подсистемы до достижения предельного состояния по параметру  $x_{jz}$ . При данном методе область работоспособности будет использована более полно. Это возможно за счет применения системы автоматического управления (подналадки). По мере работы происходит уменьшение оставшегося после наладки запаса надежности и длительности последующих периодов до подналадки. Длительность периода работы до подналадки зависит от требуемого уровня безотказной работы подсистемы. В формуле (5) искомым является значение  $t$ , входящее в аргумент функции Лапласа, который будет квантилем  $x_p$ , то есть значением, соответствующим данной вероятности  $P(t)$ . Порядок расчета – для заданного значения  $P(t)$  по таблицам для квантилей нормального распределения находим соответствующее значение  $x_p$  и из уравнения (5) определяем время работы подсистемы до технического обслуживания.

Одним из важнейших вопросов теории надежности ТС ТП является определение требуемого уровня надежности, следует иметь в виду уровень надежности, при котором получается наибольший экономический эффект с учетом затрат на проектирование, создание и эксплуатацию ТС, то есть оптимальный уровень надежности.

Поэтому определение оптимального уровня надежности неразрывно связано с другими задачами, решаемыми на этапе технологической подготовки: выбором технологических методов обработки, оборудования, инструментов, режимов обработки и др. Поэтому решаемая задача является комплексной и выполняется при оптимизации ТП.

Задача оптимизации технологического процесса в этом случае состоит в определении структуры и параметров процесса, при которых переменная часть приведенных затрат предприятия, зависящая от варианта технологического процесса, примет минимальное значение:

$$\begin{aligned} Z_i = \min \left\{ E_n \sum_{j=1}^n K_{ij} + \left( C_{3az} + \sum_{j=1}^n C_{\square} \oplus \sum_{j=1}^n C_{omxij} \right) + \right. \\ + \frac{a_{ij}(1-P_{ij})}{P_{ij} + a_{ij}(1-P_{ij})} \left( \sum_{j=1}^n C_{ucnpij} + \sum_{j=1}^n C_{mexij} \right) + \\ + \sum_{j=1}^n \left[ (1-a_{ij})(1-P_{ij}) \sum_{j=1}^n [P_{ij} + a_{ij}(1-P_{ij})] \right] \times \\ \times \frac{\sum_{j=1}^n [P_{ij} + a_{ij}(1-P_{ij})]}{\left( C_{3az} - \sum_{j=1}^n (C_{omxij} - C_{oij} + C_{\square mm} + C_{mexij}) \right) \}} \end{aligned}$$

где  $K_{ij} = K_{ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  $a_{ij} = a_{ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  
 $P_{ij} = P_{ij}(x_{ij}, u_{ij}, t)$ ;  $C_{mij} = C_{mij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  
 $C_{omx\ ij} = C_{omx\ ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  
 $C_{испр\ ij} = C_{испр\ ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  
 $C_{mex\ ij} = C_{mex\ ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ;  
 $C_{o\ ij} = C_{o\ ij}(x_{ij}, u_{ij})$ ,

при условиях:

$$x_{ij} = f(x_{ij}, u_{ij}, t_{ij}), \quad (6)$$

$$x_{ij}(t) \in x_i, j = \overline{1, n};$$

$$u_{ij}(t) \in u_i; \quad (8)$$

$$i \in I, i = \overline{1, m},$$

где  $\mathcal{Z}_i$  – приведенные затраты на изготовление единицы годной продукции по  $i$ -му технологическому процессу;

$E_n$  – нормальный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K_{ij}$  – удельное капитальное вложение в производственные фонды на  $j$ -й технологической операции  $i$ -го технологического процесса, приходящиеся на одну годную деталь;

$$a_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_{ij} + N'_{ij}} \text{ – коэффициент, характеризующий вероятность появления исправимого брака;}$$

$N_{ij}$  – объем произведенной продукции на  $j$ -й операции за время  $t$ , признанной по результатам контроля браком, подлежащим исправлению на дополнительной операции;

$N'_{ij}$  – объем произведенной продукции на  $j$ -й операции за время  $t$ , признанной по результатам контроля окончательны браком;

$C_{заг}$  – затраты на заготовку;

$C_{omx\ ij}$  – стоимость реализованных отходов при изготовлении одной детали на  $j$ -й операции;

$C_{mij}$  – затраты на изготовление (технологическая себестоимость) одной детали на  $j$ -й операции;

$C_{испр\ ij}$  – затраты на изготовление после  $j$ -й операции;

$C_{mex\ ij}$  – затраты на техническое обслуживание, не входящее в мероприятия, предусмотренные нормативно-технической документацией;

$C_{o\ ij}$  – стоимость реализуемого материала бракованной детали после  $j$ -й операции;

$x_i$  – множество допустимых значений вектора  $x_{ij}(t)$ ;

$x_{ij}(t)$  – фазовый вектор технологических параметров, определяющий состояние  $j$ -й операции в момент времени  $t$ ;

$u_i$  – множество допустимых значений вектора  $u_{ij}(t)$ ;

$u_{ij}(t)$  – вектор управления, компонентами которого являются управляющие технологические параметры  $j$ -й операции;

$I$  – множество допустимых вариантов технологических процессов.

К фазовым технологическим параметрам относятся показатели качества выпускаемой продукции и тakt выпуска на данной  $j$ -й операции. К управляющим технологическим параметрам относятся режимы резания, период стойкости инструмента, межоперационный допуск на размерную настройку системы СПИД и др.

Математическая модель технологического процесса представляется системой уравнений (7) (уравнений связи) и системой уравнений (8) (ограничения).

В общем случае накладываются ограничения по качеству продукции, по производительности, по расходу оборотных средств, по организационно-техническим и технологическим возможностям основных средств. Система уравнений (8) выделяет в пространстве технологических параметров область допустимых значений.

Определение численных значений технологических параметров, при которых целевая функция принимает минимальное значение, и составляет суть задачи параметрической оптимизации технологического процесса с учетом его надежности. Структурная оптимизация позволяет выявить оптимальный вариант из  $i$ -х технологических процессов после предварительной параметрической оптимизации каждого из сравниваемых вариантов.

Реализация рассмотренной методики [1] позволила решить задачу проектирования оптимальных технологических процессов изготовления асинхронных двигателей с учетом их надежности, что способствовало сокращению сроков производственного внедрения спроектированных технологических процессов на АО "Кузбассэлектромотор" и снижению приведенных затрат на изготовление асинхронных взрывобезопасных двигателей.

Достижение требуемого уровня надежности по показателям качества и производительности обеспечиваются автоматическими системами управления ТП, подробно рассмотренными в [4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В. А. Основы управления качеством функционирования машин. – Кемерово: Изд-во Кузбас. политехн. ин-та, 1993. – 234 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О. В. Рыжов, А. Г. Су-

слов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

3. Проников А. С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 591.

4. Принципы построения автоматических систем управления технологическими процессами изготовления изделий машиностроения / Полетаев В. А., Калачев М. А. // Вестник КузГТУ, 1998. – № 2. – С. 3-11.

□ Авторы статьи:

Полетаев

Вадим Алексеевич,  
докт. техн. наук, зав. каф. информа-  
ционных и автоматизированных  
производственных систем КузГТУ.  
E-mail: pva@kuzstu.ru

Чичерин

Иван Владимирович,  
канд. техн. наук, доцент каф. «Инфор-  
мационные и автоматизированные  
производственные системы» КузГТУ.  
E-mail: chicivan@narod.ru

**УДК 621.787: 621.789**

**М.В.Пимонов**

## ПРОГРАММА НАГРУЖЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

В настоящее время всё большее применение находят наноструктурные материалы. В последние годы использование методов интенсивной пластической деформации становится одним из наиболее актуальных направлений для получения объёмных наноструктурных металлов и сплавов. Это обусловлено следующими факторами: получение равномерных безпористых наноструктур, большие габариты конечных изделий (для равноканального углового прессования и всесторонней изотермической ковки), а также простота технологической оснастки. Использование интенсивной пластической деформации позволяет повысить микротвердость титана в 1,9 раз, предел текучести более чем в 4 раза при сохранении удовлетворительной пластичности. В работе [1] чистую Си (99,996 %) подвергали РКУП, полученные результаты представлены на рис.1. Здесь заметен не только рост прочности, достигающей рекордных значений для Си, но и сохранение пластичности.

На сегодняшний день основными являются три способа интенсивной пластической деформации:

**Всесторонняя изотермическая ковка** принципиальная схема которой представлена на рис. 2., способ был разработан и используется для получения объемных наноструктурных полуфабрикатов из различных материалов. Ковка заготовки осуществляется в температурно-скоростных режимах, выбранных в ходе предварительных исследований. Схема всесторонней изотермической ковки способствует равномерному распределению деформации в объёме заготовки. Однако, в конечном счёте, равномерность развития рекристаллизационных процессов и соответственно однородность микроструктуры обеспечиваются как правильно выбранными температурно-скоростными условиями ковки, так и её схемой. Всесторонняя ковка ведётся до достижения 100% рекристалли-

зованного объёма.

Всесторонняя изотермическая ковка является универсальным методом, применимым не только к пластичным металлам и сплавам, но и к трудно-деформируемым материалам [2].

При **деформация кручением под высоким давлением** (КВД) Благодаря «стеснённым» условиям деформации (высокому гидростатическому давлению) в материал удалось внести значительную энергию деформации и не допустить при этом его разрушения.

Деформационное наноструктурирование материалов методом КВД является простым методом, который позволяет получать наноструктуру с уменьшением размера зёрен до  $d = 10 - 20$  нм [3, 4, 5]. Конструкция установки деформации кручением (рис. 3) Полученные таким образом образцы имеют форму дисков диаметром 10 – 20 мм и толщиной 0,2 – 0,5 мм. Этот метод используется чаще всего при получении нано-структурных образцов для исследования физических свойств.

При реализации **равноканального углового прессования** заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом 90°.

При необходимости, в случае труднодеформируемых материалов, деформация осуществляется при повышенных температурах или при увеличенных углах пересечения каналов. Для уменьшения контактного трения используется смазка.

Данным методом сильное измельчение микроструктуры может быть достигнуто относительно легко уже после одного или нескольких проходов, как в чистых металлах, так и в сплавах. Однако обеспечение формирования однородных УМЗ структур с большеугловыми границами зёрен методом РКУ-прессования требует заметно больше-