



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИН



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИН

Под общей редакцией академика П. А. Витязя



Минск
«Беларуская навука»
2010

Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 109 с. ISBN 978-985-08-1238-4.

На основе синергетического подхода рассмотрены модели утраты работоспособности узлов трения. С позиций технологического наследования эксплуатационных показателей предложены мероприятия по обеспечению качества изделий. Разработана математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем.

Изучены особенности управления процессами совмещенной и комбинированной обработки, формирующими комплекс физико-механических и геометрических параметров качества. На основе статистического анализа предложен метод управления многофакторными процессами, использующий комплексные диаграммы.

Сформированы основные положения системного подхода к проблеме механики технологического наследования. Разработана концепция технологического наследования состояния поверхностного слоя в терминах механики деформирования и разрушения в виде совокупности функционалов, описывающих основные закономерности переноса свойств по операциям механической обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием с последующей эксплуатацией деталей в условиях приложения циклических нагрузок.

Предложена классификация предельных состояний машины и ее компонентов. Представлены методические положения, позволяющие определять ресурс машины, отображающие вероятностный характер несущей способности деталей и вариацию условий эксплуатации, зависимое поведение компонентов и сложную логику предельных состояний составных частей машины. Создана методологическая основа управления конструктивно-технологическими свойствами машины как многоуровневого иерархически структурированного ресурсного комплекса при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Табл. 10. Ил. 49. Библиогр.: 103 назв.

Ав т о р с к и й к о л л е к т и в:

- В. Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук, проф. (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси),
В. Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН, д-р техн. наук, проф. (Кузбасский государственный технический университет),
А. С. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук, проф. (Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана),
П. А. ВИТЯЗЬ, академик, д-р техн. наук, проф. (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси),
В. А. ГАЙКО, канд. техн. наук (ГНПО «Центр» НАН Беларуси),
А. И. ГОРДИЕНКО, академик, д-р техн. наук, проф. (Физико-технический институт НАН Беларуси),
С. А. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф. (Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины),
А. И. КОНДАКОВ, д-р техн. наук, проф. (Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана),
В. Н. КОРЕШКОВ, канд. техн. наук, доц. (Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь),
М. Л. ХЕЙФЕЦ, д-р техн. наук, проф. (ГНПО «Центр» НАН Беларуси)

Р е ц е н з е н т ы:

- М. С. ВЫСОЦКИЙ, академик, д-р техн. наук, проф. (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси),
В. Л. СОЛОМАХО, д-р техн. наук, проф. (Белорусский национальный технический университет)

ВВЕДЕНИЕ

2010 год объявлен в Республике Годом качества, а это значит, что требования, которые предъявляет к характеристикам продукции глобальный международный рынок, производителям следует удовлетворять в максимальной степени. В условиях жесткой конкуренции качество продукции должно расти опережающими темпами, а это возможно обеспечить только на основе научного анализа, со всесторонними исследованиями формирования показателей качества на всех этапах жизненного цикла изделий.

Одной из ключевых проблем машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин технологическими и эксплуатационными методами. Долговечность деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя, параметры которого формируются на протяжении всего технологического процесса и стадий эксплуатации.

Среди технологических методов, повышающих долговечность детали на заключительных стадиях технологического маршрута, в производстве широко используются методы упрочняющей обработки. Практика показала, что при правильно назначенных режимах обработки можно увеличить долговечность детали в десятки раз, в то время как неверно назначенные режимы и отсутствие учета накопления дефектов на предшествующих операциях могут привести к разрушению поверхностного слоя уже на этапе изготовления или к преждевременному разрушению детали на стадиях эксплуатации.

В настоящее время не вызывает сомнения необходимость учета технологического наследования при исследовании существующих и проектировании новых технологических процессов. Это стало возможным благодаря исследованиям П. И. Ящерицына, А. М. Дальского, Э. В. Рыжова, В. М. Смелянского, их коллег и учеников.

Старейшему основоположнику учения о технологической наследственности Петру Ивановичу Ящерицыну в этом году исполнилось бы 95 лет. Близко знавшие его, работавшие вместе и развивающие далее его научные исследования представители различных организаций Национальных академий Беларуси и Украины, университетов России, Беларуси и Украины, Госстандарта Республики Беларусь подготовили эту книгу.

В представленной монографии авторским коллективом, включающим специалистов в области проектирования и производства материалов и конструкций, стандартизации и управления качеством продукции, с единых позиций

наследования параметров качества функциональных элементов рассмотрены проектные, производственные и эксплуатационные этапы жизненного цикла машины.

В первой главе книги предложено при автоматизированном проектировании интенсивных методов обработки конструкционных материалов использовать доминирование свойств отношений технологических решений. Получены критерии, описывающие доминирование контролируемых параметров технологической системы. Рассмотрено проектирование плазменно-механической, электромагнитной и электронно-лучевой поверхностной упрочняющей обработки конструкционных материалов.

Применение синергетической концепции позволило авторам сформировать математическую модель технологического и эксплуатационного наследования показателей качества, описывающую различные режимы поведения при производстве и применении технических систем. Использование математической модели при компьютерном проектировании предоставляет широкие возможности для сокращения затрат при изготовлении и эксплуатации конструктивно-сложных изделий машиностроения.

На основе синергетического подхода рассмотрены модели утраты работоспособности узлов трения. С позиций технологического наследования эксплуатационных показателей предложены мероприятия по обеспечению качества изделий. Разработана математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделия, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем.

Во второй главе монографии изучены особенности управления процессами совмещенной и комбинированной обработки, формирующими комплекс физико-механических и геометрических параметров качества. На основе статистического анализа предложен метод управления многофакторными процессами, использующий комплексные диаграммы.

Показано, что технология автоматизированного проектирования систем управления динамическими объектами на основе использования структурного анализа заключается в выполнении последовательности таких этапов, как: определение класса решаемых задач; разработка программных модулей; моделирование динамических объектов; расчет параметров модели; анализ результатов моделирования; решение о применимости разработанной модели. Отмечено, что использование сочетания статистического и структурного анализа обеспечивает моделирование и управление многофакторных технологических операций по комплексу параметров, определяет и оптимизирует факторы, через которые должен осуществляться процесс управления, и указывает параметры, которые следует контролировать в режиме реального времени.

В результате исследований, представленных в первой части книги, определено трудно формализуемое, но необходимое условие структурного анализа при детализации операций технологического процесса – выделение из многочисленных технологических воздействий управляющих технологических

факторов обработки. Показано, что при использовании структурного анализа комбинированной термомеханической обработки для детализации на структурной диаграмме технологической операции следует разделять группы физико-механических и геометрических параметров качества. Установлено, что для управления геометрическими параметрами следует использовать факторы размещения и движения инструмента, а для управления физико-механическими параметрами – термомеханические факторы. В качестве мероприятий по оперативному управлению процессом предложены: регулирование интенсивности тепловыделения и скорости движений обработки, а также долговременный статистический контроль определяющих геометрического и физико-механического параметров качества.

В третьей главе монографии технологическое наследование рассматривается как совокупность сложных явлений переноса зависимых друг от друга параметров качества детали. Показано, что технологическое наследование не может быть описано одномерными моделями, а рассмотрение технологической цепочки «режим – состояние поверхностного слоя – эксплуатационные свойства» предполагает наличие сложных связей в виде функционалов. Разработка моделей технологического наследования в виде системы функционалов потребовала описания физических закономерностей формирования поверхностного слоя деталей машин. Наличие такого описания позволило не только проследить закономерности технологического наследования, но и применить их как для пооперационного контроля с использованием физических методов, так и для проектирования технологий, обеспечивающих высокую долговечность деталей машин.

В четвертой главе книги предложена классификация предельных состояний машины и ее компонентов. Рассмотрены методические положения ресурсных расчетов, охватывающих простые одномерные расчеты, расчеты объектов, подверженных усталостным повреждениям и износу, многомерные расчеты машины как системы с различными нагруженными компонентами и предельными состояниями. Представлены новые расчетные инструменты: модели многоциклового усталости в ресурсной форме, трибофатические коэффициенты, ресурсно-прочностные кривые, вероятностная модель условий эксплуатации машины, схемы предельных состояний. Они в совокупности позволяют проводить ресурсные расчеты, корректно отображая вероятностный характер несущей способности деталей и вариацию условий эксплуатации, зависимое поведение компонентов и сложную логику предельных состояний машины, ее составных частей.

В результате создана методическая основа управления конструктивно-технологическими свойствами машины как многоуровневого иерархически структурированного ресурсного комплекса при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Таким образом, в монографии показано, что преимущество решений при математическом моделировании, конструкторско-технологическом про-

ектировании, производстве и эксплуатации сложных технических систем базируется на принципах передачи свойств в жизненном цикле изделий. Компьютерная поддержка жизненного цикла изделий с использованием CALS-технологий требует в настоящее время разработки сквозных математических моделей наследования комплекса показателей качества изделий.

Научные результаты, представленные в книге, получены авторами в рамках следующих программ исследований.

Государственная комплексная программа научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг. «Исследование механики технических и биомеханических систем, разработка эффективных методов повышения их надежности, создание новых компонентов машин и оборудования для машиностроения» (КГПНИ «Механика»). Задание: Механика 3.03 «Разработка методов прогнозирования и обеспечения надежности мобильных машин при их виртуальном проектировании». Задание: Механика 2.16 «Разработка технологических основ создания и промышленного применения композиционных многослойных систем на основе оксидокерамики, поверхностно модифицированных антифрикционными материалами с нанонаполнителями, обеспечивающих повышенную нагрузочную способность и улучшенные триботехнические свойства элементов опор скольжения». Проект: «Моделирование технологических методов упрочнения поверхностных слоев с учетом их различного функционального назначения». Совместный проект Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований по техническим наукам на 2010–2012 гг. № Т10Р-067 «Синтез наноструктурных алмазных и подобных материалов и определение рациональных условий их применения на основе комплексного анализа и параметризации неравновесных процессов формирования фаз».

Федеральная целевая программа РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», мероприятие № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук». Проект № П342: «Формирование и трансформация наноструктурного состояния поверхностного слоя при комбинированной упрочняющей обработке и эксплуатации ответственных деталей машин».

Аналитическая ведомственная целевая программа МОиН РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)». Мероприятие: № 2 «Проведение фундаментальных исследований в области естественных, технических и гуманитарных наук, научно-методическое обеспечение развития инфраструктуры вузовской науки». Раздел: № 2.1 «Проведение фундаментальных исследований в области естественных, технических и гуманитарных наук». Подраздел: № 2.1.2 «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук». Проект № 2.1.2/2566: «Научные основы технологического наследования наноразмерной дефектной структуры поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки, эксплуатации и восстановления ответственных деталей машин».

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий [1, 2]. Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [3, 4].

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом – технологической или эксплуатационной средой при тождественности результатов такой замены. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения его показателей качества и осуществлять направленное формирование технологической и эксплуатационной среды. Эти среды должны предусматривать благоприятное развитие полезных свойств и пресечение развития свойств, снижающих качество изделий, путем использования технологических и эксплуатационных барьеров [5, 6].

Особенно актуально понижение размерности задачи описания трансформации свойств при создании новых интенсивных методов обработки, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [7].

В общем виде системная модель технологии [8, 9] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: материальной и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-химических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения определенной формы, размеров и свойств изделия.

В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [8, 9].

1.1. Моделирование процессов интенсивной обработки

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР). Такой подход [9, 10] позволяет любой метод обработки представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества ТР.

Полагая, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор ТР по эквивалентности и предпочтению [10]. По эквивалентности выбираются разноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбираются решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора ТР по конкретному значению установленного критерия выбора и дает возможность выбирать решение по нескольким критериям, соответствующим различным свойствам ТР.

Анализ свойств отношений. Принятие ТР в системах автоматизированного проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ($x \equiv y$) и предпочтения (нестрогого $x \leq y$ или строгого $x < y$) решений, заложенных в базу знаний [11]. Это предполагает использование свойств [12]:

- 1) рефлексивности ($x \equiv x$, $x \leq x$ – истинно; $x < x$ – ложно);
- 2) симметричности ($x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$ – истинно; $x \leq y$ и $y \leq x \Rightarrow x = y$ – антисимметрично; $x < y$ и $y < x \Rightarrow$ взаимоисключение – несимметрично);
- 3) транзитивности ($x \equiv y$ и $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$, $x \leq y$ и $y \leq z \Rightarrow x \leq z$, $x < y$ и $y < z \Rightarrow x < z$ – истинно).

В результате, используя свойство транзитивности, наиболее предпочтительное из предыдущих решений сравнивается с новым предложенным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

Однако в общем случае разные неэквивалентные ТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества из требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее ТР ($x \ll y$), характеризующееся свойствами [12]:

- 1) антирефлексивности ($x \ll x$ – ложно);
- 2) несимметричности ($x \ll y$ и $y \ll x \Rightarrow$ взаимоисключение);
- 3) нетранзитивности (из $x \ll y$ и $y \ll z$ не следует $x \ll z$).

Синергетический подход. При отсутствии симметричности и транзитивности для определения доминирования параметра целесообразно применить синергетическую концепцию, использующую понятие моды непрерывной случайной величины, под которой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум [13].

Распределения случайных величин, на фоне которых проявляются моды, описываются законами [14]:

- 1) равномерным $f(x) = 1/(\mu_1 - \mu_0)$, при $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$;
- 2) экспоненциальным $f(x) = (1/\mu) \exp(-x/\mu)$, при $\mu > 0, x > 0$;
- 3) нормальным $f(x) = (1/(\sigma \sqrt{2\pi})) \exp(-(x - \mu)^2/(2\sigma^2))$, при $\sigma > 0, -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$ или др.,

где μ – математическое ожидание; μ_0 и μ_1 – ограничения; σ^2 – дисперсия случайных величин x .

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения, а следовательно, о характере проявления моды, позволяет отношение Романовского:

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k},$$

где λ_p^2 – критерий Пирсона; k – число степеней свободы, т. е. количество групп в изучаемом ряду, рассчитанных (μ, σ и др.) и используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик.

Статистический анализ характеристик производственной системы в рамках широкой номенклатуры применяемых технологий, оборудования и средств оснащения позволяет ограничить номенклатуру рассматриваемых объектов и процессов. При выборе количества ограничений для объектов и процессов целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований по надежности и гибкости производственной системы. В результате соотношение надежности – устойчивости и гибкости – адаптивности может служить критерием, позволяющим принять ТР о рациональной структуре производственной системы.

Самоорганизующиеся системы. В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [15]. Каждая подсистема i имеет выходы: q_1 – детерминированный строго определенный и q_2 – флуктуирующий с рассеянными характеристиками.

Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков равен

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)}.$$

Считая, что в условиях производства $q^{(i)}$ – независимая случайная величина, полная величина выхода следующая:

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)}.$$

Полный выход, согласно предельной центральной теореме, растет пропорционально числу подсистем n , в то время как величина рассеяния – пропорционально квадратному корню \sqrt{n} . Эти оценки основаны на анализе линейной зависимости, на самом же деле обратная связь, присущая производственным системам, приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик [15, 16].

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества <i>(под ред. М. Л. Хейфеца)</i>	7
1.1. Моделирование процессов интенсивной обработки	8
1.2. Проектирование операций интенсивной обработки	13
1.3. Анализ процессов изнашивания поверхностей	17
1.4. Проектирование маршрутных технологических процессов	22
1.5. Автоматизация проектирования технологических процессов	28
Литература к главе 1	31
Глава 2. Автоматизированное управление и контроль параметров качества <i>(под ред. В. Н. Корешкова)</i>	33
2.1. Структурный анализ и синтез технологических процессов	34
2.2. Декомпозиция блоков модели технологического процесса	37
2.3. Управление процессами многофакторной обработки	41
2.4. Управление и контроль специальных процессов	42
2.5. Статистическая модель многофакторной технологической операции	48
2.6. Управление многофакторной технологической операцией	51
Литература к главе 2	56
Глава 3. Модели механики технологического и эксплуатационного наследования <i>(под ред. В. Ю. Блюментейна)</i>	58
3.1. Накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности	58
3.2. Функциональная модель механики наследования	63
3.3. Декомпозиция функциональной модели по этапам нагружения	67
3.4. Модель процесса формирования и трансформации поверхностного слоя	72
3.5. Состояние поверхностного слоя при обработке и эксплуатации детали	75
3.6. Функциональная модель технологического проектирования	78
Литература к главе 3	84
Глава 4. Определение ресурса машины и ее компонентов <i>(под ред. В. Б. Альгина)</i> ...	86
4.1. Критерии оценки работоспособности машин	87
4.2. Оценка долговечности и прочности компонентов машин	88
4.3. Определение ресурса при многоцикловой усталости	90
4.4. Многоцикловая усталость и износ	97
4.5. Прогнозирование ресурса машины как сложной системы	99
Литература к главе 4	104
Заключение	107