

**Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко**

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРОВ**

**2–е издание**

Под редакцией доктора физико–математических наук,  
профессора, заслуженного деятеля науки РФ

***Г. Г. Бондаренко***

*Рекомендовано УМО по образованию в области прикладной  
математики и управления качеством  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Управление качеством»*

**Москва ■ Юрайт ■ 2012**

УДК 620.22  
ББК 30.3я73  
Б81

**Авторы:**

**Бондаренко Геннадий Германович** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения Московского государственного института электроники и математики (технический университет), заслуженный деятель науки РФ;

**Кабанова Татьяна Александровна** — кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Московского государственного института электроники и математики (технический университет);

**Рыбалко Владимир Витальевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Московского государственного института электроники и математики (технический университет).

**Рецензенты:**

*Лопатин В. В.* — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электрофизики Томского политехнического университета;

*Марголин В. И.* — доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

**Бондаренко, Г. Г.**

Б81      **Материаловедение : учебник для бакалавров / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2012. — 359 с. — Серия : Бакалавр.**

ISBN 978-5-9916-1587-7

В учебнике рассмотрены характеристики металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов, являющиеся базовыми для разработки систем управления качеством промышленной продукции. Приведены сведения о строении, свойствах и методах получения материалов. Подробно рассмотрены аспекты, связанные с влиянием на рабочие характеристики материалов режимов их производства, хранения и эксплуатации (температура, механические, радиационные и иные виды воздействий).

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту ВПО третьего поколения.

*Для студентов, обучающихся по специальностям, входящим в направление подготовки дипломированных специалистов 657000 «Управление качеством».*

УДК 620.22  
ББК 30.3я73

ISBN 978-5-9916-1587-7

© Бондаренко Г. Г., Кабанова Т. А.,  
Рыбалко В. В., 2012

© ООО «Издательство Юрайт», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Этапы развития человеческого общества связывают с названием материалов: каменный век, бронзовый век и т. д. Такая материаловедческая хронологика не случайна. Именно объем знаний о свойствах материалов, а следовательно, сумма технологий их получения и обработки, в конечном итоге определяет степень развития производительных сил общества, т. е. достигнутый уровень цивилизации.

Качественный скачок в совершенствовании техники возможен либо при создании новых материалов, обладающих уникальными характеристиками, либо в результате установления ранее не известных свойств традиционно используемых материалов.

Наглядным примером, доказывающим правильность данного утверждения, может служить история развития электронной техники. На основе одних и тех же знаний о материалах строились радиосистемы А.С. Попова и радиоаппаратура времен Второй мировой войны. Конструктивные усовершенствования на протяжении более полувека позволяли улучшать отдельные характеристики электротехнических устройств при практически неизменных габаритах и энергопотреблении. Но с открытием ряда новых свойств полупроводниковых материалов появилась возможность перейти от громоздких, энергоненасытных монстров к миниатюрным, микрopotребляющим системам.

Применение новых материалов и технологий, модификация их свойств обеспечили увеличение скорости обработки информации на 5—6 порядков, снижение удельного энергопотребления в тысячи раз.

Необходимость удовлетворения возрастающих требований различных отраслей промышленности к материалам и структурам с улучшенными свойствами делает особо значимыми вопросы обеспечения и управления качеством производства технических материалов. При этом построение системы управления качеством производства и применение промышленных материалов требуют ясного представления о тех процессах, в результате протекания которых характеристики материалов могут изменяться.

Настоящий учебник разработан на базе материалов лекций, прочитанных в рамках курса «Материаловедение» в Московском государственном институте электроники и математики (техническом университете).

## Г Л А В А 1. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Под *качеством* подразумевается совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Основные факторы, влияющие на качество продукции, приведены на рис. 1.1.

Качество продукции может быть оценено с помощью набора характеристик свойств продукции, которые называются показателями качества.

Показатель технического эффекта или назначения призван оценить полезный эффект от применения продукции по назначению. Например, концентрация (плот-



**Рис. 1.1.** Факторы, оказывающие влияние на качество продукции

ность) дислокаций в кремниевом монокристалле, предназначенном для производства БИС, или твердость и износостойкость сплава, предназначенного для производства пар трения.

Показатели надежности характеризуют способность изделия (в частности, материала как изделия) сохранять свои заданные свойства в течение определенного срока при наличии оговоренных внешних воздействий. В число показателей надежности входят безотказность (вероятность возникновения отказа при определенных условиях), время наработки на отказ, сохранность, ресурс или срок службы. Применительно к материалам в эту группу показателей включают предел временной усталости, температуростойкость и другие (будут рассмотрены в последующих главах).

Показатели экономического использования позволяют оценить затраты материальных ресурсов, связанные с изготовлением продукции и ее последующим применением. Если речь идет о материалах, то экономические показатели включают в себя и оценку экономической эффективности, возникающей из-за замены ранее использованных материалов на новые, обладающие улучшенными свойствами. Например, пластики с повышенной текучестью в рабочем диапазоне температур позволяют использовать более простые по конструкции, а следовательно, и менее дорогие пресс-формы. Замена быстрорежущей стали на более прочную и износостойкую металлокерамику позволяет выпускать режущий инструмент, имеющий больший ресурс работы. В результате сокращены материальные и временные затраты на переналадку станков, связанные с частой заменой инструмента.

Эргономические показатели позволяют оценить качество продукции с точки зрения приспособленности ее к использованию (эксплуатации) человеком. Обычно данные показатели имеют характер экспертной оценки.

Экологические показатели характеризуют уровень вредных воздействий на природу при использовании промышленной продукции.

Показатели безопасности характеризуют безопасность персонала, использующего или обслуживающего изделие. Для материалов это в первую очередь их токсичность.

Гигиенические показатели: уровень шума, вибрации, излучения, запыленность и др. Очевидно, что эти параметры, характеризующие устройства, определяются также и свойствами материалов, из которых эти устройства изготовлены.

Кроме перечисленных основных показателей используют также антропометрические и физиологические показатели, но они относятся в большей степени к конструкции изделий, а не к материалам, из которых они выполнены.

В частных случаях могут использоваться дополнительные показатели качества, например технологичность, наукоемкость, патентно-правовые и проч.

Качество любой промышленной продукции, исключая soft (объекты интеллектуальной собственности), в значительной степени зависит от свойств примененных в ней материалов. Это обусловлено тем, что требования к качеству материалов и связанных с ними технологий лежат в основе логической последовательности процесса развития техники (рис. 1.2).

Применительно к материалам система управления качеством направлена в первую очередь на обеспечение воспроизводи-

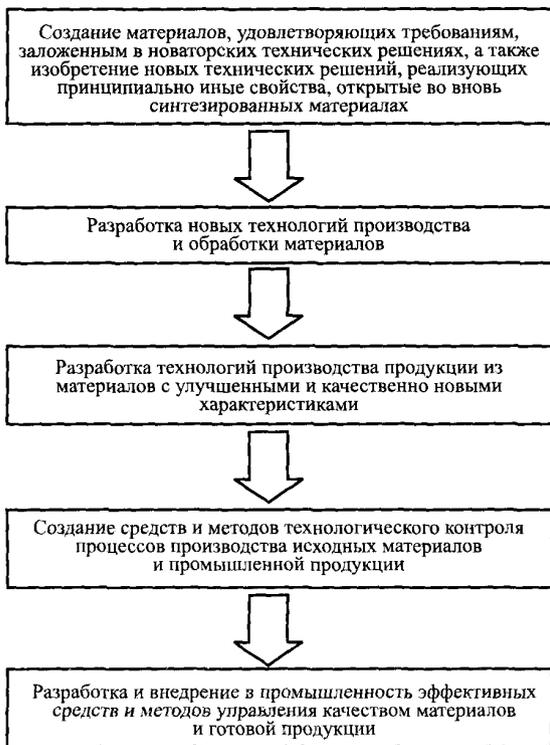


Рис. 1.2. Логика развития объектов техники

сти заданной для данного материала группы свойств и всемерно возможного улучшения показателей этого материала, а также технологических процессов, с ним связанных. Причем разнообразие промышленно применимых материалов и их основных технологических и потребительских свойств огромно. Оставляя в стороне экономические показатели, рассмотрим такой пример: при выпуске полупроводниковых кристаллов не контролируются механические свойства готовой продукции. В то же время выпускающий завод должен обеспечить заданный уровень таких характеристик, как плотность дислокаций в монокристалле, время жизни неравновесных носителей заряда, тип проводимости и ее величину, допустимые уровни концентраций примесей, перечень этих примесей и др. Напротив, при производстве бериллиевых бронз, предназначенных для изготовления упругих элементов в контакторах, система мероприятий по управлению качеством продукции должна обеспечить в первую очередь заданные значения механических свойств выпускаемых сплавов (пределы упругости и прочности, твердость и др.), величину электро- и теплопроводности.

**Управление качеством и жизненный цикл продукции.** Система управления качеством представляет собой совокупность технических и организационных мер, реализуемых на всех стадиях жизни промышленной продукции от изучения рынка (маркетинговых исследований) и формулирования Технического задания на разработку изделия вплоть до утилизации и переработки продукции в конце срока ее службы (см. рис. 1.1).

Первые четыре этапа (рис. 1.3) относятся к предпроектной и заводской стадии жизненного цикла промышленной продукции. На этом этапе исследуют потребности рынка и возможности предприятия по их удовлетворению. На основании этих исследований вырабатывают требования к перспективной конкурентоспособной продукции, реализация которой могла бы удовлетворить имеющийся спрос. Эти требования излагают в Техническом задании на разработку нового изделия (продукции).

Параллельно с процессом разработки выбирают материалы, свойства которых позволяют реализовать проектируемые параметры перспективного изделия. Основываясь на результатах разработки и учитывая конструктивные и иные особенности опытного образца, отработывают технологию производства, включая и создание системы контроля качества используемых материалов, комплектующих изделий и готовой продукции.

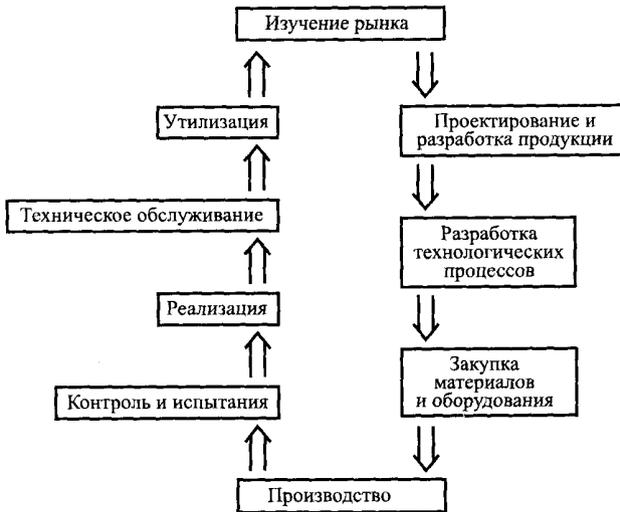


Рис. 1.3. Этапы жизненного цикла промышленной продукции

Вторая стадия жизненного цикла продукции — **производственная**. Она включает в себя собственно производство, контроль качества и реализацию.

Из теории построения систем управления известно, что они призваны решать следующие задачи: стабилизацию; выполнение программы; слежение; оптимизацию.

Система управления качеством на этапе производства (изготовления) продукции решает в первую очередь задачу стабилизации. Эта задача в данном случае заключается в обеспечении соответствия показателей качества продукции тем требованиям, которые были сформулированы в документации на нее (Техническое задание — ТЗ, Технические условия — ТУ, конструкторско-технологическая документация — КТД и др.). Гарантией соблюдения указанных требований является контроль качества выполнения отдельных технологических операций и контроль параметров готовой продукции.

Для контроля качества и приемки изделий предусмотрены следующие категории контрольных испытаний: **приемо-сдаточные**; **периодические**; **типовые**; **сертификационные**.

Все типы испытаний, предусмотренных для данной продукции, и их параметры (периодичность, полнота, метрологические характеристики и проч.) должны быть изложены в ТУ на продукцию.

Приемо-сдаточные испытания предназначены для контроля изготовленной партии изделий на соответствие требованиям ТУ. Изделия, у которых при приемо-сдаточных испытаниях проверяют не все эксплуатационные параметры, подвергаются в процессе хранения и эксплуатации периодическим испытаниям.

Цикличность (раз в месяц, раз в квартал или иное) и объем периодических испытаний (размер выборки из партии и перечень контролируемых параметров) должны быть указаны в ТУ.

Типовые испытания проводят в том случае, если в выпускаемую продукцию планируется ввести конструктивные или технологические изменения. Таким испытаниям подвергаются образцы продукции, подвергшиеся указанным изменениям. Целью типовых испытаний является выяснение допустимости вводимых в изделие или технологию его производства изменений.

Сертификационные испытания проводятся для установления соответствия испытываемых изделий требованиям государственных стандартов и ТУ на данные изделия.

Все перечисленные выше испытания, кроме сертификационных, проводит отдел технического контроля (ОТК). Он является, как правило, самостоятельным структурным подразделением промышленного предприятия.

Сертификационные испытания проводит уполномоченный государством орган по сертификации (испытательный центр). По результатам испытаний он выдает сертификаты и лицензию на применение знаков соответствия. В дальнейшем сертифицированный продукт подвергается периодическим испытаниям и в случае, если очередная проверка выявила отклонения качества продукции от параметров, по которым проводилась сертификация, орган по сертификации приостанавливает или отменяет действия выданных им сертификатов.

Управление качеством на стадии эксплуатации (потребления) промышленной продукции сводится к максимально возможному использованию ее потребительских свойств в соответствии с назначением продукции и областью ее применения. Эти свойства могут полностью или частично утрачиваться под действием субъективных и объективных обстоятельств. Применительно к промышленным материалам эти обстоятельства выглядят следующим образом.

Объективные обстоятельства — деградация под действием внешних воздействий (коррозия металлов вследствие воздействия агрессивных сред, деструкция полимеров под действием

света, снижение прочностных характеристик в результате длительного и/или циклического механического воздействия, изменение структуры материала, инициированное повышением температуры, снижение электрической прочности электроизоляционных материалов при воздействии влажной среды и др.).

К субъективным обстоятельствам можно отнести нарушение правил применения (например, технологии обработки) и хранения.

Утрата одного или нескольких свойств продукции (в частности, деградация характеристик материалов) может привести к отказу изделия, т. е. сделать невозможным выполнение изделием своих функций. Следовательно, на стадии эксплуатации особое внимание в системе управления качеством должно уделяться надежности продукции.

Надежность на стадии эксплуатации поддерживается в основном за счет рациональной организации системы хранения, технического обслуживания и ремонта.

В отношении материалов как промышленных изделий приоритетными являются:

- организация условий хранения (уровень влажности, освещенности, температура, тип и состояние упаковки);
- соблюдение технологической дисциплины (последовательность выполнения технологических операций и их режимов) при изготовлении из материалов деталей и узлов;
- организация технического обслуживания и соблюдения условий использования материалов в составе изделий (смазка рабочих поверхностей в парах трения, антикоррозионная защита поверхностей металлических деталей и проч.).

В процессе эксплуатации изделие последовательно проходит три состояния:

- работоспособное (вероятность выхода из строя близка к нулю);
- предотказное (вероятность отказа резко повышается);
- неработоспособное.

Очевидно, что длительность пребывания изделия в первых двух состояниях (они в сумме составляют срок службы) и соотношение их продолжительностей зависит от:

- надежности изделия (закладывается на этапе проектирования и реализуется на этапе изготовления);
- специфики применения (назначение изделия и внешние условия эксплуатации);

- стратегии обслуживания (перечень работ по техническому обслуживанию и ремонту изделия и совокупность правил проведения этих работ).

Стратегия обслуживания зависит от заложенной на стадии проектирования надежности изделия, а также от специфических особенностей изделия и условий его применения.

Применительно к эксплуатации материалов примером ремонтпригодного изделия может служить стальной кузов автомобиля. Изделие эксплуатируется в течение периода  $T_1$ . Далее выполняют профилактический ремонт кузова, т. е. снимают старое антикоррозионное покрытие, удаляют металл в образовавшихся очагах коррозии, вновь проводят антикоррозионную обработку. После этого изделие в очередной раз запускают в эксплуатацию. Процедуру обслуживания повторяют с заданной цикличностью в течение всего срока службы изделия. Последний может ограничиваться суммарным коррозионным разрушением, накапливающимся в процессе эксплуатации кузова.

В том случае, если изделие не является ремонтпригодным, например микросхема, стратегия ее обслуживания в составе радиоэлектронного узла сводится к контролю и управлению режимом ее эксплуатации (предотвращение подачи на контакты микросхемы вольтовых и токовых сигналов, амплитуды и/или длительности которых превышают допустимый предел, контроль и управление температурным режимом работы).

Следует обратить внимание на то, что факт нахождения изделия в работоспособном, а не в предотказном состоянии, не всегда очевиден для большинства случаев. Поэтому для таких изделий стратегия обслуживания в ряде случаев предусматривает разработку процедуры определения работоспособности, а также выбор критерия (или набора критериев) для количественной оценки работоспособности.

Важность сбалансированной стратегии обслуживания таких изделий определяется как экономическими, так и техническими факторами, в том числе факторами, связанными с безопасностью эксплуатации изделий. Действительно, если проверку работоспособности производить слишком часто, то значительная доля времени будет занята непроизводительными простоями, связанными с выполнением проверок. Такая ситуация снижает производительность изделия и оборудования, в состав которого это изделие входит в качестве комплектующего, и, как результат, ухудшает экономические показатели применения из-

деля. В то же время необоснованно редкие проверки работоспособности приведут к двум негативным последствиям:

- вероятность отказов оборудования возрастет, а следовательно, снизится его экономическая эффективность из-за значительных временных и материальных затрат на проведение ремонтных работ и устранение последствий, вызванных отказом изделия;
- непрогнозируемый отказ оборудования может быть связан с риском для здоровья или жизни людей, риском нанесения ущерба окружающей среде. В этой ситуации оборудование может стать просто опасным для его эксплуатации.

В общем случае задача оптимизации обслуживания продукции, требующей периодического испытания ее работоспособности, может быть сформулирована следующим образом:

- разрабатывают показатели оценки эффективности использования оборудования;
- используя разработанные показатели, оценивают и выбирают оптимальный перечень испытаний работоспособности изделий и объем выборки для испытаний;
- исходя из перечня испытаний и выборки устанавливают оптимальную периодичность проведения испытаний.

**Нормативно-правовая база управления качеством.** Основные понятия и положения в области управления и обеспечения качества продукции, применяемые в международной и отечественной практике, изложены в документах ИСО, МЭК и Госстандарта РФ.

ИСО (International Organization for Standardization) действует с 1947 г., в ее состав входят национальные органы 130 стран, в том числе и России. Организация создана для содействия глобальной стандартизации. ИСО разрабатывает международные стандарты практически для всех отраслей промышленности, кроме тех, что относятся к компетенции МЭК.

МЭК — Международная электротехническая комиссия, основана в 1906 г. Она призвана содействовать международному сотрудничеству в вопросах стандартизации и смежных проблемах в области электротехники, радиоэлектроники и связи. С момента образования ИСО МЭК стала ее филиалом.

Официальными языками ИСО и МЭК являются английский, французский и русский.

Начиная с 2000 г. и по настоящее время семейство стандартов ИСО основывается на следующих четырех базовых стандартах:

- ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь;
- ИСО 9001. Системы менеджмента качества. Требования;
- ИСО 9004. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности;
- ИСО 19011. Руководящие указания по проверке систем менеджмента качества и охраны окружающей среды.

**Стандарт ИСО 9000** заменил более ранние нормативные документы ИСО 8402-94 и ИСО 9000-1-94.

**Стандарт ИСО 9001** объединил в себе ранее действовавшие ИСО 9001, ИСО 9002 и ИСО 9003.

В России стандарты ИСО вводятся так называемым «методом обложки», т. е. делается их аутентичный перевод, они утверждаются под соответствующими названиями и регистрируются по действующим в стране правилам.

Для согласования и систематизации действия всех участников разработки, производства и использования продукции в нашей стране утверждены перечисленные ниже классификаторы:

- Общероссийский классификатор предприятий и организаций (ОКПО);
- Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- Общероссийский классификатор услуг населению (ОКУН);
- Международный классификатор «Товарная номенклатура внешней экономической деятельности» (ТН ВЭД);
- Международный классификатор стран мира.

Законодательной базой управления качеством в России являются следующие государственные законы: «О защите прав потребителей»; «О стандартизации»; «Об обеспечении единства измерений»; «О сертификации продуктов и услуг».

Технической особенностью производства материалов и их дальнейшего промышленного использования является то обстоятельство, что свойства материалов могут кардинальным образом меняться под действием внешних и внутренних факторов (механические нагрузки, тепловое и радиационное воздействие и проч.). Например, два сплава, характеризующиеся одинаковым элементарным составом, подвергшиеся разному тепловому воздействию, могут иметь разную структуру и, как следствие, существенно различающиеся свойства. Поэтому технически грамотное построение системы управления качеством производства и применения промышленных материалов требует не только знаний

исходных свойств материалов, но и ясного представления о тех процессах, в результате протекания которых характеристики материалов могут изменяться. Причем такие изменения могут происходить на всех этапах жизненного цикла продукции.

### **Контрольные вопросы**

1. Что включает в себя понятие «качество» применительно к промышленной продукции?
2. Перечислите факторы, влияющие на качество.
3. Какие показатели используются для характеристики качества продукции?
4. Из каких этапов складывается жизненный цикл промышленной продукции?
5. На какие категории (типы) подразделяются контрольные испытания продукции?
6. Перечислите основные стандарты ИСО.
7. Какие государственные акты составляют законодательную базу управления качеством в России?