



ЭЛЕМЕНТЫ ДЕФЕКТОЛОГИИ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

И. П. БЕЛОКУР, А. М. ОВСЯНКИН, А. П. КУДРИН

Рассмотрены особенности выбора показателей качества, классификации дефектов, возникающих на различных этапах жизненного цикла авиационной техники (АТ), а также обоснованы методы НК на этапах ее производства и эксплуатации с учетом материалов современных авиационных конструкций. Приведены рекомендации по решению задач контроля технического состояния и обеспечения надежности АТ.

Considered are the features of selection of quality indices, classification of defects, initiating at different stages of the life cycle of aeronautic systems (AS), methods of NDT in the stages of their production and operation are substantiated, allowing for the spectrum of materials of currently used aircraft structures. Recommendations are given on solving the problems of controlling the technical condition and ensuring the reliability of AS.

Управление качеством продукции неразрывно связано с технической дефектологией, позволяющей решать актуальные задачи повышения качества и предупреждения дефектов. При управлении качеством АТ с помощью дефектологии решаются задачи обеспечения надежности и ресурса конструкций [2]. При этом методы дефектологии используют для исследования характеристик материалов изделий с учетом особенностей конструкций, технологий их изготовления и условий эксплуатации.

Основные задачи дефектологии — выбор показателей качества, методов их оценки, а также выявление факторов, влияющих на качество [1]. Учитывая, что конструкция воздушного судна (ВС) состоит из большого количества деталей и узлов из различных материалов, работающих при неодинаковых нагрузках и в различных условиях, качество конструкций оценивают по множеству показателей, выбор которых связан со многими про-

изводственными и эксплуатационными факторами [3]. Основными комплексными показателями качества изделий АТ являются показатели назначения, включающие потребительские свойства: надежности, технологичности, экономичности, а также определяющие воздействие на людей.

Они в свою очередь включают ряд единичных показателей, по совокупности которых оценивается качество ВС (рис. 1). Количественную оценку качества изделия в целом с учетом вклада единичных показателей проводят по комплексному показателю K :

$$K = \sum_{i=1}^n (m_i q_i) / n,$$

где q_i — единичный показатель качества; m_i — коэффициент его весомости; $i = 1, 2, \dots, n$ — количество показателей качества.

Показатели качества изделий выбирают с учетом не только их изменяемости в производстве и

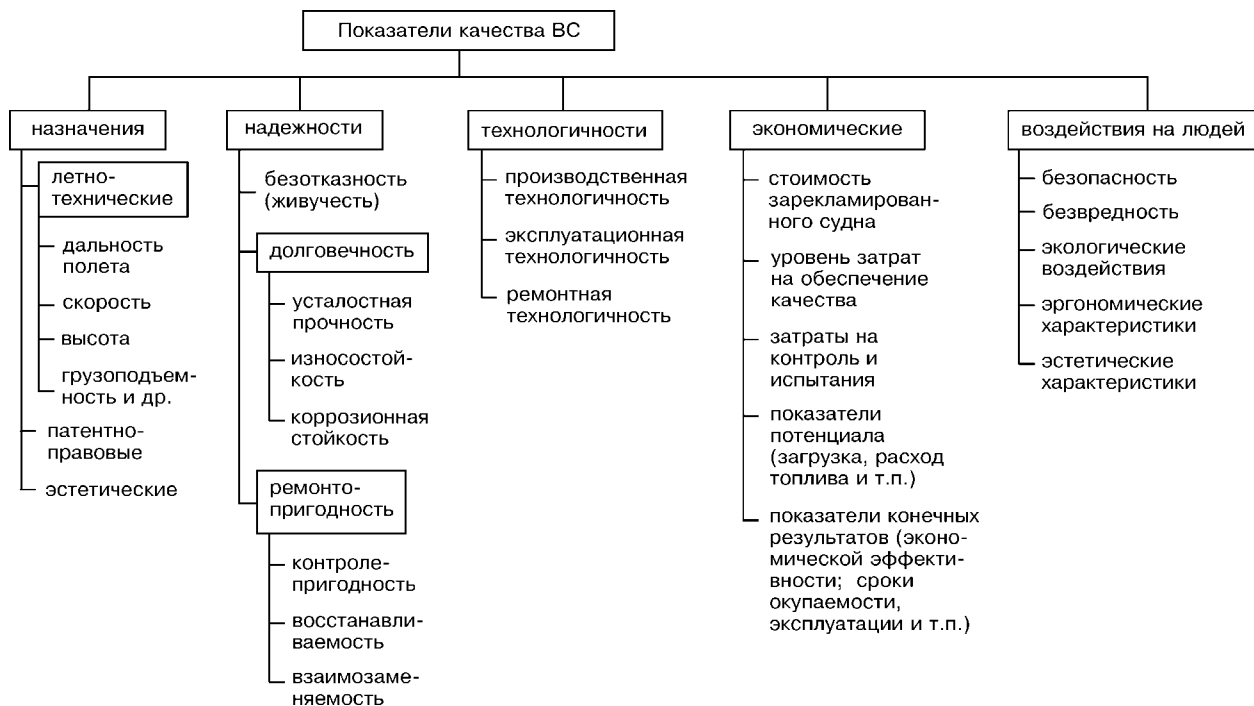


Рис. 1. Классификация показателей качества ВС

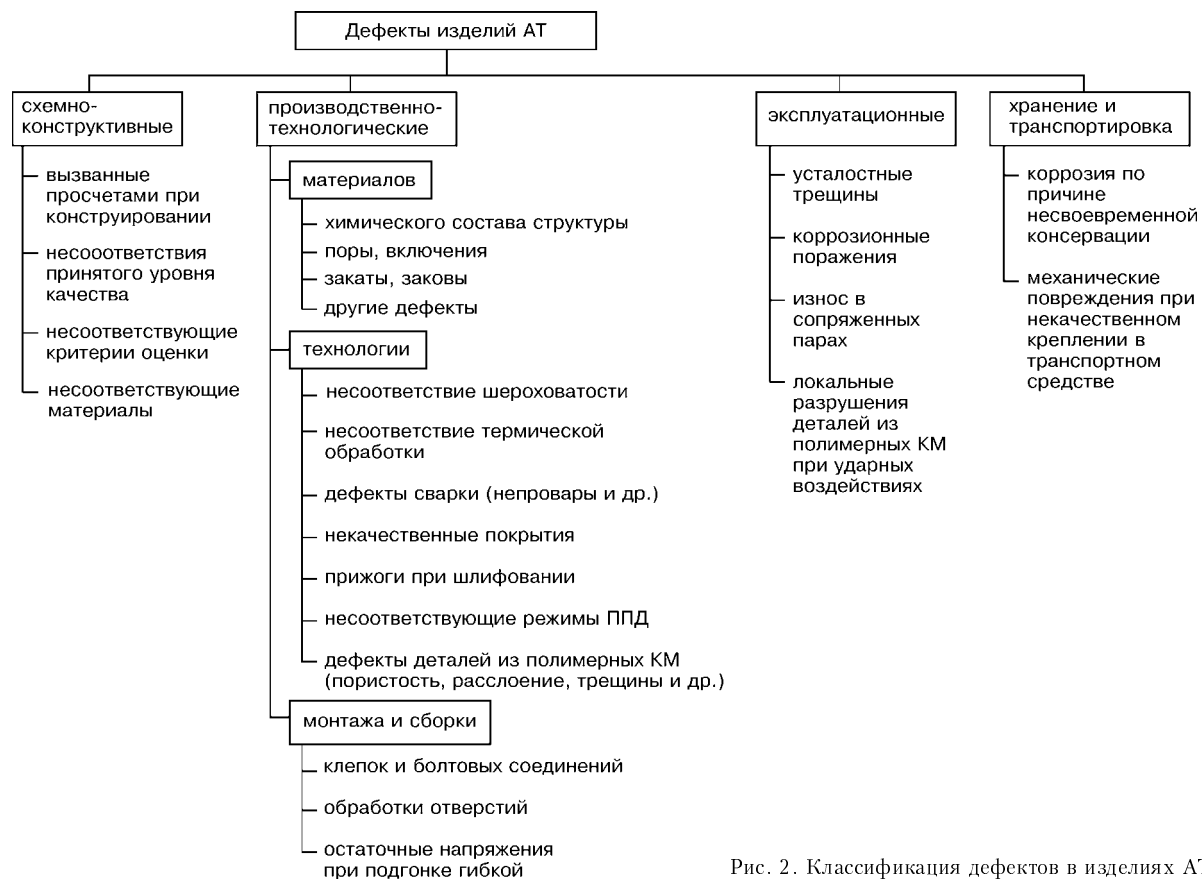


Рис. 2. Классификация дефектов в изделиях АТ

эксплуатации, но и исходя из возможности их определения методами контроля (во многих случаях только неразрушающими).

Формирование требуемых показателей качества АТ происходит с определенной последовательностью технологических операций, которые рассматриваются чаще в виде блоков: заготовительные (литье, прессование, прокатка и др.); обработка (термическая и механическая, сварка); сборочные и монтажные (обработка отверстий, подгонка гибкой, постановка болтов и заклепок). Эти операции в большей или меньшей степени формируют свойства материала изделий в объеме, поверхностном слое и в локальных зонах. Во всех случаях большое значение имеет качество исходных материалов, ассортимент которых в настоящее время значительно расширился. Например, в ответственных конструкциях ВС широко используют высокопрочные стали, алюминиевые и титановые сплавы, композиционные материалы (КМ).

Изменение показателей качества изделия в процессе эксплуатации имеет свои специфические закономерности, связанные с видом и величиной внешнего воздействия на конструкцию. Недопустимые изменения качества (несоответствие определенным требованиям) определяются термином «дефект» (ГОСТ 16504–80).

Несоответствия (дефекты) могут возникать не только по технологическим и эксплуатационным причинам, но и в результате ошибок, допущенных при проектировании (например, при неправильном подборе материалов в паре трения и т. п.). При-

чиной быстрого разрушения в процессе эксплуатации может быть также неправильное хранение изделий или их несвоевременная консервация.

Для выявления и классификации возможных дефектов различных конструкций необходимо однозначно определить, к какой группе относятся эти дефекты: производственные или эксплуатационные, поверхностные или в объеме, локальные или по всему изделию, плоскостные или объемного характера и др.

Зная особенности возникновения и развития дефектов на разных этапах жизненного цикла изделия, можно наиболее объективно решить задачу их выявления определенными методами, устанавливать параметры контроля.

С учетом этапов жизненного цикла изделий АТ предлагается вариант классификации дефектов по группам [3]: проектирования, производства, эксплуатации, хранения и транспортировки (рис. 2). Из них наиболее распространенными являются производственные и эксплуатационные, поэтому максимальный объем контроля, в частности, неразрушающего, приходится на этапы производства и эксплуатации. При этом контролю подвергаются не только готовые изделия и детали, но и полуфабрикаты после выполнения промежуточных операций. Причем, одно изделие в процессе изготовления может проверяться несколькими методами.

Оценку качества исходных материалов проводят по структуре и химическому составу, как правило, вихретоковым методом по значению удельной электрической проводимости, используя структу-

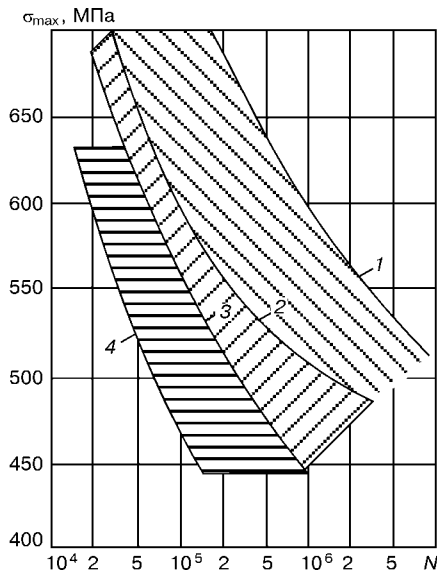


Рис. 3. Сопротивление усталости сварочных соединений из титанового сплава ВТ6 при повторном растяжении: 1-2 — для бездефектной сварки; 2-3, 3-4 — разрушения от внутренних и поверхностных пор соответственно; N — количество циклов нагружения

роскопы типа ВЭ, ИЭ и другие, работающие в низком диапазоне рабочих частот. Для выявления несплошностей типа пор и включений в заготовках и полуфабрикатах широко применяют УЗ методы.

В требованиях к авиационным конструкциям, работающим в условиях циклических нагружений, устанавливают нормы на наличие пор в детали, особенно в поверхностном слое, так как они оказывают значительное влияние на выносливость (рис. 3). На последнюю характеристику влияют также параметры поверхностного слоя (шероховатость, фазовый состав, физико-механические свойства, остаточные напряжения), которые формируются при механической и термической обработке и существенно влияют на эксплуатационные свойства конструкции. Так, шероховатость R_z снижает долговечность конструкции вследствие увеличения концентрации напряжений (рис. 4). При оценке шероховатости обычно используют оптические методы контроля, например, интерференционный или сравнение с эталонами.

С целью повышения усталостной прочности для многих авиационных конструкций используют специальные технологические способы, такие, как поверхностно-пластическое деформирование (ППД). При такой обработке создаются остаточные напряжения сжатия в тонком (порядка 0,1 мм) слое и сглаживается шероховатость поверхности. При правильном выборе режима обработки достигается повышение долговечности до 5 и более раз (рис. 5). Качество механической обработки проверяется обычно спектральным методом вихретокового НК, известным как метод высших гармоник (МВГ) [4].

Качество термической обработки контролируют или вихретоковым, или магнитным методом с использованием соответствующих структуроскопов. При этом выявляют такие дефекты, как крупнозернистость структуры, не соответствующая ТД твердость, внешние и внутренние трещины, деформации [5].

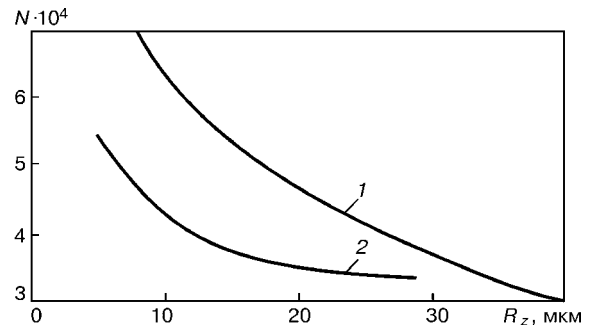


Рис. 4. Влияние на долговечность шероховатости R_z поверхности образцов из титанового сплава ВТ: 1 — отнулевой изгиб ($\sigma_{max} = 750$ МПа); 2 — повторное растяжение ($\sigma_{max} = 800$ МПа, коэффициент асимметрии цикла $R = 0,1$)

Для разработки и реализации экспертных систем контроля, предотвращения дефектов важно знать причины их появления. Так, причиной возникновения деформаций при термообработке являются внутренние напряжения в материале, которые могут быть исключены медленным охлаждением при закалке в области температур мартенситного превращения. При эксплуатации появляются усталостные повреждения (трещины), коррозия и износ при трении в сопряженных парах. Первые возникают при знакопеременных (циклических) нагрузках в разнообразных деталях авиационных конструкций при механических и температурных воздействиях. Наиболее опасны такие повреждения в силовых элементах: шпангоутах, стрингерах, лонжеронах, соединительных кронштейнах, валах, лопатках компрессоров и турбин двигателей, лопастях воздушных винтов и др. Они возникают в зонах концентрации напряжений: в области отверстий, изменения сечений деталей, в галтельных переходах и т. п.

Усталостная прочность конструкции обеспечивается в первую очередь выбором материалов, которые при циклических нагрузках на ее элементы

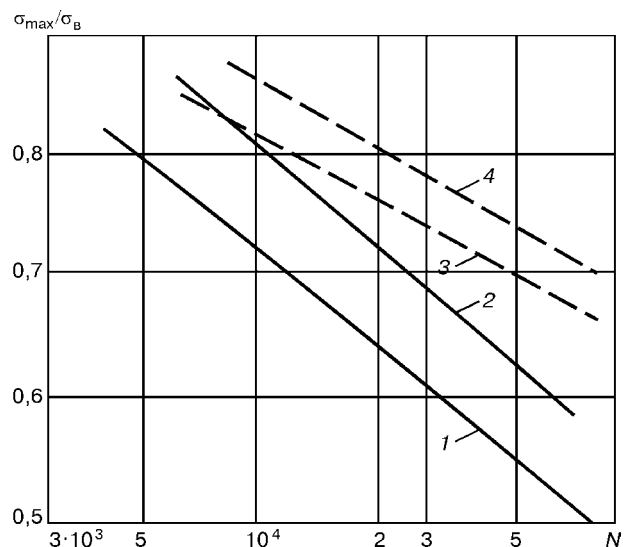


Рис. 5. Графики относительной малоциклового усталости высокопрочных сталей при отнулевом растяжении образцов из стали: 1, 3 — 40ХН2СМА ($\sigma_b = 1900$ МПа); 2, 4 — 30ХГСН2А ($\sigma_b = 1600$ МПа); 1, 2 — после шлифования; 3, 4 — после виброупрочнения

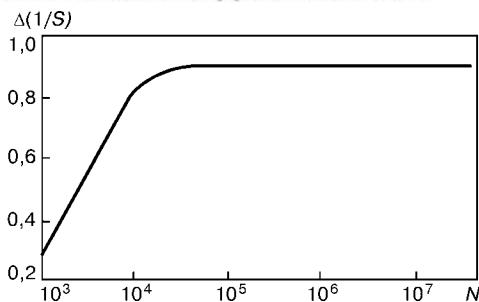


Рис. 6. Изменение удельной электропроводности $\Delta(1/\rho)$ КМ при циклическом нагружении

должны отвечать требованию выносливости, характеризующейся коэффициентом K :

$$K = \sigma_{-1} / \sigma_B,$$

где σ_B — предел выносливости; σ_{-1} — предел прочности.

Материал приемлем для работы в конструкции на этапе до появления усталостного повреждения, если его коэффициент K будет не меньше величины, обратной расчетному коэффициенту перегрузки: $K \geq 1/(nf)$, где n — максимальная эксплуатационная перегрузка (для пассажирских самолетов обычно устанавливается на уровне 2,5...3,0); f — коэффициент запаса прочности (обычно принимают $f = 1,5$).

В зависимости от материала детали и размеров дефектов для выявления последних используют почти все наиболее распространенные в авиационном производстве методы контроля: ультразвуковой, магнитный, вихретоковый, капиллярный, радиационный и оптический. Методики и карты контроля разрабатывают для каждой отдельной конструкции с учетом ее особенностей. Во многих случаях для обеспечения надежности и живучести конструкции в конструкторской документации задают минимальные размеры обнаруживаемых дефектов. Например, для деталей двигателя и шасси минимальное раскрытие выявляемых трещин должно быть в пределах десятых долей микрометра. Такие требования обеспечиваются не только использованием соответствующих методов, приборов и технологий, но и разработкой специального оборудования, контрольных и стандартных образцов для проверки и настройки приборов.

Значительное снижение прочности конструкции вызывает коррозионные повреждения деталей. При этом сплошная коррозия снижает прочностные характеристики вследствие уменьшения сечения детали, а локальная (например, питтинговая) увеличивает концентрацию напряжений в отдельных зонах. В алюминиевых и магниевых сплавах часто возникает межкристаллитная коррозия. Такие повреждения характерны для закрытых зон конструкции (например, в соединениях обшивка—стрингер) и требуют выполнения контроля через обшивку. Для контроля таких дефектов чаще используют вихретоковые методы с применением специальных режимов при определенных параметрах контроля, например, с использованием пониженных рабочих частот. Однако в некоторых случаях чувствительности вихретокового контроля недостаточно, и тог-

да применяют другой метод, например, капиллярный, обеспечивающий выявление межкристаллитной коррозии.

Износ деталей в сопряженных парах — один из самых распространенных дефектов конструкций АТ — связан не только с изменением размеров деталей, но и с уменьшением толщины поверхностного слоя, который может быть или модифицированным (азотированным, алитированным, оксидированным и т. п.) или представлять собой покрытие типа хромирования, кадмирования и др. В таких случаях для оценки работоспособности деталей и использования их ремонтных размеров важно знать толщину такого поверхностного слоя. С этой целью используют магнитные (индукционные) толщинометры, а также различные вихретоковые методы, например, спектральные типа МВГ. Иногда такому контролю должны предшествовать теоретические и экспериментальные исследования.

К особой группе могут быть отнесены дефекты деталей и конструкций из КМ, обладающих по сравнению со сплавами значительно большей неоднородностью в микромасштабе из-за различия в свойствах составляющих компонентов. По виду структурных составляющих КМ разделяют на волокнистые (состоящие из волокон и матрицы); слоистые (из слоев различных материалов); дисперсно-упрочненные (состоящие из матрицы, наполненной частицами); псевдосплавы (состоят из матрицы или каркаса, наполненных легкоплавким порошковым материалом); эвтектические (получаемые путем направленной кристаллизации эвтектических сплавов).

В качестве матрицы в материалах для авиационных конструкций чаще используют полимерные материалы, а в качестве наполнителя — угле- и стекловолокна. В современных ВС массовая доля элементов из таких материалов может достигать 25 %.

Возникновение дефектов в деталях из КМ в значительной степени связано с нарушениями технологии производства. К таким дефектам относятся поры, микротрещины, зоны неравномерного отверждения матрицы, разрывы волокон и др. В эксплуатации разрушение КМ происходит ступенчато: вначале происходит разрыв волокон с передачей нагрузки матрице, а затем при определенном их накоплении разрушается деталь. Постепенное снижение жесткости материала обеспечивает живучесть конструкции и позволяет обнаруживать повреждение на безопасном этапе [6].

Выявление дефектов КМ в процессе производства и эксплуатации конструкций связано с косвенным определением изменяющихся при этом их физических свойств (электрических, тепловых, акустических). Необходимо учитывать, что изменения свойств КМ в целом связаны с изменением свойств волокон и матрицы [3]. Так, для углепластика типа КМУ-3Л в процессе его циклического нагружения наблюдается увеличение удельной электропроводности $1/\rho$ до определенного уровня, который далее остается постоянным до разрушения образца (рис. 6). Электропроводность материала детали определяется только электропроводящими

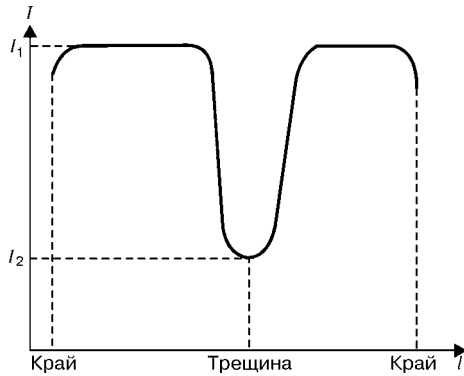


Рис. 7. Изменение потерь на вихревые токи I в КМ: I_1, I_2 — показания индикатора в зависимости от потерь; l — длина сканирования образца

свойствами волокон. Момент разрушения угольных волокон может быть выявлен по резкому увеличению потерь на вихревые токи (рис. 7).

Изменение механических характеристик полимерной матрицы углепластика, обладающей свойствами диэлектрика, связано с возникновением в ней пустот, трещин, пористости, влагонасыщения. Наиболее эффективно состояние матрицы оценивают по изменению диэлектрической проницаемости, определяемой электрическим методом, при помещении КМ в конденсаторный преобразователь:

$$\epsilon = 10^5 C d / (89 S),$$

где C — емкость конденсатора, пФ; d — расстояние между обкладками конденсатора, м; S — площадь обкладки, м².

Для различных уровней воздействий получают зависимости диэлектрических свойств матрицы от степени деструкции. Так, циклическое нагружение снижает емкость C преобразователя, в который помещают материал после разного количества циклов нагружения N (рис. 8).

Появление зон концентрации напряжений в КМ можно обнаружить по изменению амплитуды прошедших УЗ колебаний.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проблемы дефектоскопии конструкций современных ВС связаны с широким спектром дефектов, возникающих на различных этапах существования изделий при разных видах воздействий и в разных условиях. Выбор наиболее подходящих средств и методов контроля должен проводиться с учетом природы дефектов изделий из различных материалов, а также исследований вза-

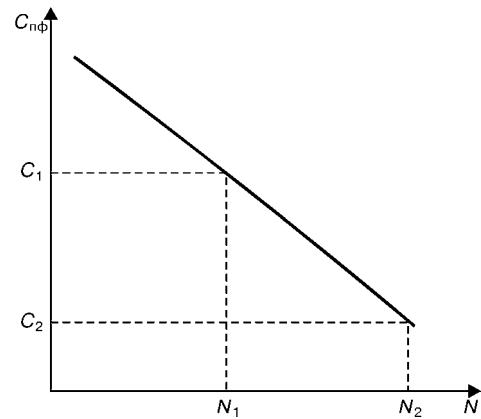


Рис. 8. Изменение диэлектрических свойств КМ при циклическом нагружении

имосвязи свойств материалов с параметрами применяемого физического поля.

Выбор методов и средств контроля проводится с учетом требований к каждой конкретной детали или всего изделия. Чувствительность и периодичность контроля устанавливается с учетом обеспечения живучести конструкций на основе оценки ее технического состояния.

Для исключения снижения ранее запланированного ресурса изделия выявляются причины появления дефектов и строятся причинно-следственные связи, на основании которых разрабатывают предложения по предотвращению дефектов в элементах конструкции.

В основе корректировки системы контроля на каждом этапе жизненного цикла изделия лежит анализ его особенностей, видов повреждений и статистика их появления, а также возможностей методов контроля.

1. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. — Киев: Вища шк., 1990. — 207 с.
2. Брондз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. — М.: Машиностроение, 1986. — 184 с.
3. Дефектология и обеспечение качества в производстве и эксплуатации авиационной техники / А. М. Овсянкин, И. П. Белокур, В. В. Лубяный и др. — Киев: Нац. авиац. ин-т, 2001. — 148 с.
4. Черняк В. В. Исследование и разработка многопараметрового электромагнитного контроля стальных изделий: Автореф. дисс. канд. техн. наук ... Киев: Киев. политехн. ин-т, 1968. — 16 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. — Справочник: В 2-х т / Под ред. В. В. Клюева. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1986.
6. Фудзи Г., Язако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с япон. — М.: Мир, 1982. — 232 с.

Нац. авиац. ун-т,
Киев

Поступила в редакцию
15.10.2002