

В.С. ЕРАСОВ, Н.О. ЯКОВЛЕВ, Г.А. НУЖНЫЙ

КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Развитие квалификационных испытаний

Надежность, экономичность, внешняя привлекательность воздушного судна обеспечиваются используемыми материалами.

Современный авиационный конструкционный материал следует воспринимать в виде полуфабриката, получаемого промышленным способом, из которого изготавливают деталь. Численное значение физико-механической характеристики, применяемой в расчетах воздушных судов при их проектировании, является интегральным показателем качества материала, учитывающим химический состав, строение, наличие различного вида дефектов, технологию изготовления полуфабриката.

Расчетные значения характеристик прочности полуфабрикатов – это численные значения прочностных характеристик материалов, которые определены при испытании образцов, вырезанных из полуфабрикатов, и выбраны для проведения расчета допустимых напряжений для критических мест, чтобы гарантировать с высокой степенью надежности неразрушение конструкции [1, 2].

Требования к определению расчетных значений характеристик статической и усталостной прочности, а также трещиностойкости приведены в пункте 613 Авиационных правил (АП Части 23, 25, 27, 29).

Указанные требования соответствуют требованиям Федеральной авиационной администрации (FAA) США. Американская система контроля качества материалов к настоящему времени хорошо проработана и имеет законченный вид. Значения расчетных характеристик прочности, методики их определения, стандарты на полуфабрикаты, разрешенные к использованию, находились в Военном справочнике-руководстве (MILITARY HANDBOOK), например MIL-HDBK-5H. Приведенные в пункте 613 АП (Часть 25) требования к толерантным пределам при определении расчетных значений характеристик прочности материалов в Военном справочнике-руководстве носят названия базис *A* и базис *B*. Добавим к ним еще указанный в Военном справочнике-руководстве типичный базис (базис *T*), определяющий средние значения характеристик прочности материалов, и базис *S*, который представляет собой значение характеристик согласно нормативной документации. Достаточного статистического обоснования базис *S* не имеет.

Следует отметить тот факт, что с 2003 года выходит преобразованный из MIL-HDBK-5H справочник-руководство MMPDS-02 (Metallic Materials Properties Development and Standardization), который приобрел статус общенационального справочника для конструкторов и сертификационных агентств. Авторское право на справочник-руководство принадлежит FAA. Вместе с Федеральными авиационными правилами, например FAR 25, справочник-руководство охватывает всю проблему квалификации авиационных материалов.

Рассмотрим подробнее пути реализации требований, предъявляемых при определении расчетных значений характеристик прочности по базисам *A*, *B*, *S*, *T*.

Традиционно определяют расчетные значения характеристик прочности по типичному базису. Для этого необходимо провести испытания по требуемым стандартам и рассчитать средние значения определяемых характеристик. Только средние значения характеристик – без показателей надежности их определения, функции распределения, учета возможного разброса – не позволяют провести расчет надежности конструкции, а ее проектирование потребует применения высоких значений коэффициентов запаса прочности. Поэтому использование базиса T целесообразно только для характеристик, имеющих незначительный разброс значений и малое количество влияющих на этот разброс факторов.

Расчетные значения по базисам A и B могут быть получены несколькими способами. Все способы объединяет требование получения выборки данных результатов испытаний образцов, изготовленных из нескольких полуфабрикатов одного типа, отбираемых из разных плавов (партий) материала случайным образом, оптимально представляющей генеральную совокупность. Эти полуфабрикаты должны быть изготовлены по серийной технологии с отклонениями по химическому составу, параметрам технологии формообразования и режимам конечной термической обработки, которые не должны превышать величин, допускаемых стандартами на материал.

Такая выборка называется достаточной или представительной выборкой экспериментальных данных. Она должна быть получена на таком количестве экземпляров полуфабрикатов, в таком количестве мест и на таком количестве образцов, чтобы полученная совокупность значений отражала все факторы, влияющие на отклонение исследуемой характеристики, и обеспечивала правомерность и надежность статистического анализа.

Для количественного описания закономерностей рассеяния результатов механических испытаний используются известные в теории вероятностей распределения, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом. Наиболее широко применяемыми для этой цели непрерывными параметрическими распределениями являются нормальное распределение (распределение Гаусса), распределение Вейбулла, логарифмически нормальное распределение, гамма-распределение, бета-распределение и др. Широко применяемые функции распределения табулированы [3–10].

На рис. 1 схематически представлены результаты статистической обработки данных механических испытаний образцов из металлического полуфабриката, где кривая накопленной частоты $F_n(\sigma)$ аппроксимирована гладкой кривой $F(\sigma)$. Мето-

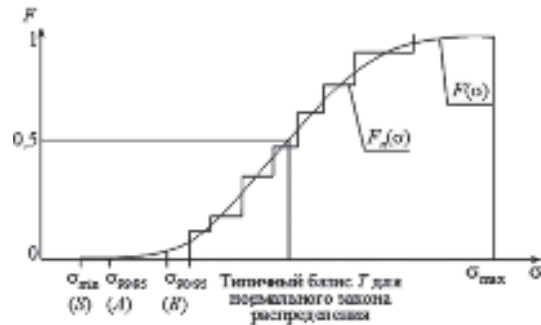


Рис. 1. Эмпирическая функция распределения $F_n(\sigma)$ (ступенчатая функция) и генеральная функция распределения $F(\sigma)$ (гладкая кривая) характеристики прочности (σ_B – временное сопротивление при растяжении; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести при растяжении; $\sigma_{0,01}$ – сопротивление смятию и др.) для полуфабрикатов одного типа, базисы A , B , S и типичный базис, определяющие расчетные значения характеристики прочности

дика обработки данных для определения базисов A и B представлена в справочнике-руководстве MMPDS (глава 9). По ней величины расчетных значений по базисам A и B получают параметрическими методами (для количества значений не менее 100), если $F(\sigma)$ можно представить в виде распределения Гаусса или Вейбулла. В противном случае базисы определяют непараметрическими методами. Для этого количество значений должно быть не менее 299.

Полученные таким образом численные значения характеристик прочности являются толерантными пределами распределений, обеспечивающими 99%-ную (A -базис) с 95%-ным доверительным интервалом и 90%-ную (B -базис) с 95%-ным доверительным интервалом вероятности неразрушения. Такие расчетные значения используются при проектировании воздушного судна.

Следующим важным шагом является модернизация стандартов на производство полуфабрикатов – Технических условий (ТУ). Решение о возможности применения материала на стадии проектирования или модификации воздушного судна может быть принято на основе данных, приведенных в паспорте на материал. Паспорт на материал (полуфабрикат) – документ установленной формы, содержащий комплекс сведений о материале, необходимый для выбора материала на стадии проектирования изделий и создания их модификаций, устанавливающий его преимущества перед ранее разработанными материалами с указанием условий и областей его применения, т.е. паспортные сведения должны быть подтверждены достаточным объемом статистических данных, которые целесообразно использовать при получении расчетных значений.

В 2009 году объединенными усилиями ведущих специалистов отрасли был выпущен справочник [11], аналогичный американскому справочнику-руководству MMPDS-02. Однако объем представленных в справочнике данных ограничен и уступает по количеству характеристик американскому справочнику. Справочник необходим отрасли для сертификации воздушных судов и их выхода на мировой рынок, поэтому следует активно готовить следующие выпуски справочника, наполняя его новыми данными.

Специалистами лаборатории «Прочность и надежность материалов воздушного судна» за последние 5 лет проведены масштабные работы по квалификационным испытаниям материалов для фирм «Боинг», «Аэрбас», ОАО «ОКБ Сухого», ЗАО «Гражданские самолеты Сухого» и они готовы к выполнению такой масштабной работы.

Применение жесткого цикла нагружения

Среди механических свойств конструкционных металлических материалов важное место занимают усталостные характеристики, так как в подавляющем большинстве случаев для деталей машин основным видом нагружения являются повторные и знакопеременные нагрузки. При этом усталостное повреждение материалов в элементах конструкций в процессе эксплуатации может привести к снижению расчетного времени эксплуатации и выходу конструкции из строя. Отличительной особенностью усталостного разрушения является его внезапность, вследствие локальности разрушения конструкции. Поэтому, важную информацию представляет определение момента начала накопления повреждений, при котором возможно «вылечивание» конструкции (снятие внутренних напряжений термической обработкой изделия).



Рис. 2. Схема полной кривой усталости:

N_k – ограниченная долговечность при переходе от малоцикловой к многоцикловой усталости; N_G – базовое число циклов; σ_B – временное сопротивление; σ_P – напряжение перехода от одного вида разрушения к другому при малоцикловой усталости; σ_K – предел выносливости при переходе от малоцикловой к многоцикловой усталости; σ_R – напряжение предела выносливости; σ_T^H – циклический предел текучести

Возможным методом решения задач по определению остаточного эксплуатационного ресурса и момента возможного «вылечивания» конструкции является испытание на малоцикловую усталость с жестким циклом нагружения (управление по деформации).

Результаты испытаний могут быть представлены в виде изменения петли гистерезиса (рис. 3). По петле гистерезиса можно наблюдать рост или падение напряжения, которое соответствует текущей несущей способности материала. Если ввести в данную диаграмму третью координату (продолжительность или число циклов нагружения), то можно определить момент, в который в испытываемом материале зарождаются микродефекты, приводящие к падению прочности вследствие «разрыхления» материала.

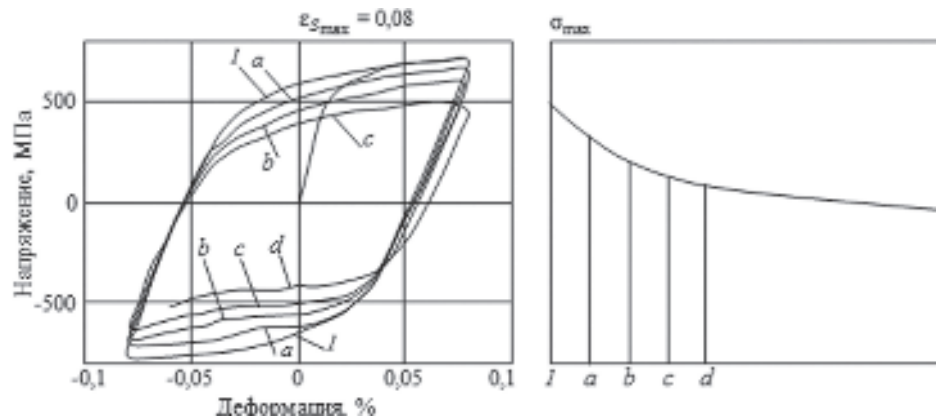


Рис. 3. Петли гистерезиса при жестком цикле усталостного испытания на стадии разупрочнения:

I – первый цикл нагружения; a, b, c, d – последующие циклы нагружения ($1 < a < b < c < d$); $\varepsilon_{s_{max}}$ – максимальная полная (упругая + пластическая) амплитуда деформации

Результаты испытаний на усталость при жестком цикле нагружения можно использовать, в первую очередь, при исследованиях и разработках материалов для ранжирования их по способности сопротивляться усталости, выбора ресурса эксплуатации, после которого материал при усталостном нагружении сохраняет способность к восстановлению исходных свойств, и получения информации по совершенствованию структуры и состава материала для эксплуатации в условиях усталостного нагружения.

Исследование влияния высокоэластической деформации на напряженно-деформированное состояние органического стекла

Для использования авиационных органических стекол (ОС) в качестве силового конструкционного материала в изделиях остекления авиационной техники [13], и прежде всего в скоростных самолетах, важным является достоверность оценки эксплуатационной надежности остекления с позиции прочности.

Известно, что при деформировании ОС в нем помимо упругой и пластической деформации возникает зависящая от времени высокоэластическая (ВЭ) деформация, которая вносит существенный вклад в напряженно-деформированное состояние (НДС) ОС во всем эксплуатационном диапазоне деформаций, скоростей деформирования и температур, вплоть до температуры размягчения (T_p).

Для исследования закономерностей поведения ВЭ деформации и количественной оценки ее влияния на НДС ОС при условиях, близких к условиям их эксплуатации, специалистами лаборатории «Прочность и надежность материалов воздушного судна» совместно со специалистами ФГУП «ЛИИ им. М.М. Громова» был разработан ряд методик ее оценки:

– упруго-высокоэластическо-пластических и релаксационных характеристик ОС при условиях близких к эксплуатационным [14];

– области равновесного деформирования [15];

– процессов развития и исчезновения ВЭ деформаций и др.

Экспериментальные исследования органических стекол СО-120 (линейный полимер) и ВОС-2 (поперечношитый полимер, с частично сшитой структурой) показали, что развитие ВЭ деформации в ОС начинается с момента начала нагружения уже при комнатной температуре, с ростом температуры ее доля увеличивается, а при температурах, близких к температуре размягчения стекла, – играет доминирующую роль (рис. 4).

Показано, что при комнатной температуре в эксплуатационном диапазоне деформаций в стеклах развиваются только упругая и ВЭ деформации (без развития пластической деформации), а процессы их развития и исчезновения одинаковы как при растяжении, так и при сжатии.

Полученные данные дали возможность в плоскости «напряжение–деформация» выделить две области (рис. 5): область развития ВЭ деформации (I), в которой происходит релаксация напряжений, и область исчезновения ВЭ деформации (II), в любой точке которой при выдержке с постоянной деформацией наблюдается рост напряжений до значений, лежащих на кривой равновесного деформирования.

С учетом этого при знакопеременном циклическом нагружении по жесткому режиму [16] с выдержками при постоянной деформации (рис. 6), имитирующему условия нагружения слоя остекления при эксплуатации, определено влияние ВЭ деформации на значения расчетных характеристик для авиационных ОС. Получены температурные зависимости: модуля упругости, кривых релаксации

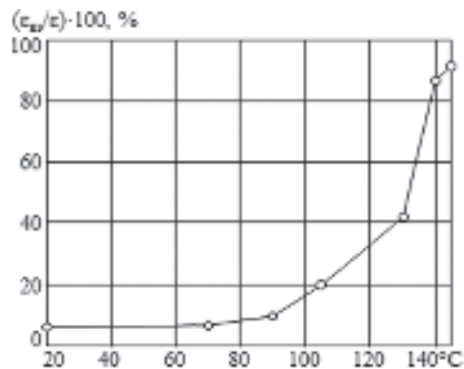


Рис. 4. Доля высокоэластической (ВЭ) деформации, развивающейся за время нагружения, при скорости деформирования, соответствующей средней скорости деформирования при эксплуатации, от общей деформации для стекла ВОС-2

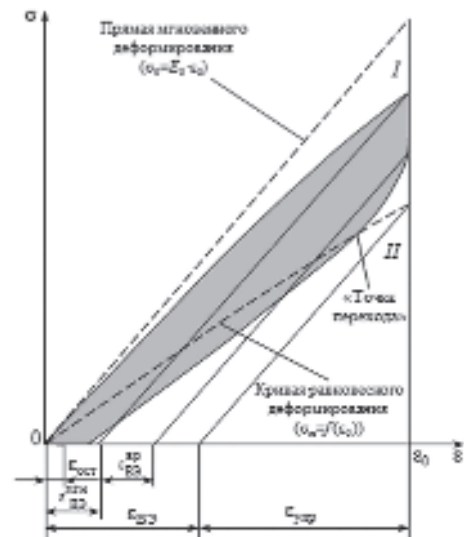


Рис. 5. Типовая диаграмма деформирования органического стекла при жестком режиме нагружения и постоянной температуре (деформации: ϵ_0 – общая; $\epsilon_{ост}$ – остаточная; $\epsilon_{упр}$ – упругая; $\epsilon_{ВЭ}$ – высокоэластическая; $\epsilon_{ВЭ}^{вр}$ – временная высокоэластическая, развивающаяся за время выдержки при постоянной деформации; $\epsilon_{ВЭ}^{мгн}$ – мгновенная высокоэластическая, развивающаяся за время нагружения)

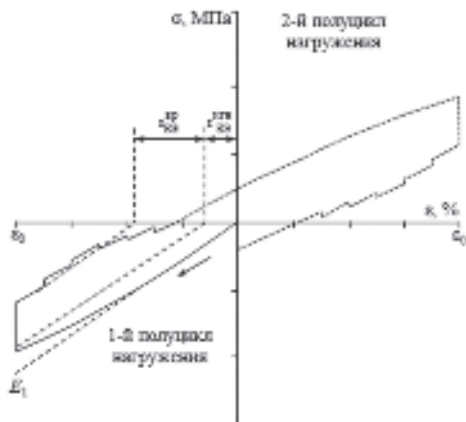


Рис. 6. Цикл нагружения образца органического стекла (обозначения – см. рис. 5)

напряжений, полноты перехода начальной деформации в ВЭ при нагружении и выдержке и полноты ее исчезновения при разгрузке, точек перехода из области развития ВЭ деформации в область ее исчезновения и др.

Полученные данные позволили специалистам ФГУП «ЛИИ им. М.М. Громова» доработать методику моделирования результирующих и остаточных напряжений в фонарях, изготовленных из оргстекла СО-120 и ВОС-2, в целях повышения точности получаемых результатов [17].

Обобщенный критерий коррозионной повреждаемости

При оценке долговечности воздушного судна остро стоит проблема определения фактора коррозионного воздействия на усталостные характеристики металлов, которая заключается в невозможности из-за временных условий совместить испытания на усталость с одновременным воздействием коррозионной среды. Проводимые ранее испытания усталостной долговечности материалов при прямых воздействиях коррозионной среды давали только качественную оценку материалов, ранжируя их в определенный ряд по степени снижения характеристик усталости для заданных условий испытаний.

Поиск обобщенного численного критерия коррозионной повреждаемости металлов, характеризующего коррозионный процесс в измеряемых единицах и обеспечивающий возможность его ускорения, не изменяя механизма коррозионного воздействия, был одной из самых интересных задач в течение последних пяти лет.

В качестве критерия коррозионной повреждаемости металлов предложена величина поверхностной плотности электрического заряда. Гипотеза обобщила критерий Г.В. Акимова по удельному изменению массы за определенный временной интервал и закон Фарадея, описывающий электрохимическое растворение металлов.

Проведены экспериментальные изыскания по обоснованию выдвинутой гипотезы и правомерности предлагаемого критерия коррозионной повреждаемости металлов, которые опирались на методику оценки усталостной долговечности металлов с регламентированными коррозионными поражениями. Разработанная в ВИАМ методика нанесения нормированных коррозионных поражений позволяет получать коррозионные поражения, характеризуемые одинаковой величиной поверхностной плотности электрического заряда при различных временных интервалах. Испытания образцов с нормированными коррозионными поражениями показали, что их усталостная долговечность определяется набранной величиной поверхностной плотности электрического заряда,

независимо от продолжительности воздействия, тем самым подтвердив правомерность предложенного критерия.

В процессе исследований по оценке нормированных электрохимических коррозионных поражений также обнаружено, что существует некоторый порог коррозионной повреждаемости, преодоление которого приводит к существенному снижению усталостной долговечности.

Выполненными исследованиями подтверждена работоспособность нового критерия коррозионной повреждаемости и установлена возможность «сжатия» времени при коррозионном воздействии, позволяющая проводить оценку усталостной долговечности при коррозионном воздействии в масштабе времени, отвечающем реальному времени эксплуатации воздушного судна.

Цели и перспектива

Одной из основных задач лаборатории в ближайшие 4 года является техническое перевооружение и реконструкция испытательной базы лаборатории. Реконструкция позволит увеличить объем испытаний с 5 до 20 тыс. образцов в год, обеспечить определение полного комплекса статистически достоверных характеристик прочности в интервале температур от -196 до $+1600^{\circ}\text{C}$ по отечественным и международным стандартам, разработать комплекс новых стандартов на испытания. Это позволит лаборатории занять ведущую позицию в Российской Федерации и стать одной из лучших лабораторий в Европе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ерасов В.С.* Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: Метод. пособие. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
2. *Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории.* МАК: ОАО «Авиаиздат». 2009. 267 с.
3. *Дарчинов Э.Н., Струнин Б.М.* Статистические методы исследования и контроля механических свойств / В кн.: Методы испытаний, контроля и исследования машиностроительных материалов. В 3-х т. Т. 2. М.: Машиностроение. 1974. С. 258–300.
4. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. Ч. 1 Деформация и разрушение. М.: Машиностроение. 1974. С. 374–414.
5. *Вейбулл В.* Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение. 1964. 275 с.
6. *Хальд А.* Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Издательство иностранной литературы. 1956. 560 с.
7. *Степнов М.Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 262 с.
8. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука. 1965. 580 с.
9. *Орлов А.И.* Тридцать лет статистики объектов нечисловой природы (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 5. Т. 75. С. 55–64.
10. *Агамиров Л.В.* Методы статистического анализа механических испытаний: Справочник. М.: Интернет Инжиниринг. 2004. 128 с.
11. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: Справочник. М.: ОАО «ОАК». 2009. Вып. 1. 268 с.

12. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
13. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия. 1981. 216 с.
14. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Ерасов В.С., Сентюрин Е.Г. Влияние эксплуатационных условий нагружения на упругопластические характеристики авиационного органического стекла // Авиационная промышленность. 2006. № 2. С. 43–48.
15. Яковлев Н.О. Оценка области равновесного деформирования ПММА / В сб. материалов четвертой Международ. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 2011 (электронная версия).
16. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Харитонов Г.М. Методика определения упругих, высокоэластических и пластических характеристик органического стека / В сб. материалов третьей Международ. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 2009. Т. II. С. 272–273.
17. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Закономерности поведения ВЭ деформаций в авиационных стеклах из линейных и поперечноспитых полимеров при знакопеременных нагружениях // Авиационная промышленность. 2011. № 3.С. 28–32.

П.Л. ЖУРАВЛЕВА, Д.В. ЗАЙЦЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Дифракционные методы анализа – рентгеноструктурный анализ (РСА) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) – наиболее часто применяются для изучения характеристик кристаллических и некристаллических структур. Эти методы являются экспрессными, информативными и наглядными, не требуют большого количества материала для исследований. В настоящее время активно разрабатывается уникальное научно-исследовательское оборудование для дифракционных исследований. Современные приборы обладают высоким разрешением, возможностью быстрой прецизионной замены модулей, что позволяет расширить круг решаемых задач. Современное программное обеспечение дает возможность выполнения всех видов анализа и поддерживает широкий спектр исследований. В данной работе рассмотрены основные РСА и ПЭМ методики и приведены примеры их комплексного применения при изучении структуры углеродных волокон с локальностью до 1 нм.

Таблица 1

Механические свойства использованных материалов

Углеродные наполнители (фирма-производитель)	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа
Лента Элур-П (ООО «Аргон»)	210	–
Жгут 3k (Toho Tenax)	240	4120
Лента ЛР300 (ООО «Ниагара»)	240	4140
Жгут IM7 (Hexcel)	280	5480
Жгут T800 (Torayca)	290	5490
Жгут ГЖ-20 (ООО «Аргон»)	380	2500
Лента Кулон-П (ООО «Увиком»)	500	2600