УДК 621.81

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ**Сёмин Михаил Иванович,**доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Теоретическая механика», ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)", Москва, Россия.

E-mail: Obris-lar@inbox.ru

Аннотация. Надежность как один из обобщающих показателей качества проявляется во времени, поэтому расчет и прогнозирование возможного поведения изделия это основа обеспечения требуемого уровня надежности, при этом статистика отказов является необходимым звеном обратной связи и нуждается в постоянном накоплении и обновлении информации как для совершенствования изделия, так и для предсказания его поведения в конкретных условиях эксплуатации в зависимости от преобладания физических процессов разрушения различной природы.

Ключевые слова: надежность, долговечность материала, прочность соединений, эксплуатация и ремонт изделий, ремонтно-восстановительные технологии, проектный расчет.

METHODS FOR STUDYING COMPONENT ELEMENTS OF DESIGNS TO ENSURE RELIABILITY AND ECONOMIC FEATURES**Mikhail I. Semin,**Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department
of Theoretical Mechanics, Moscow State Automobile and Road
Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation.

E-mail: Obris-lar@inbox.ru

Abstract. Reliability as one of the generalizing indicators of quality manifests itself in time, therefore, the calculation and prediction of the possible behavior of the product is the basis for ensuring the required level of reliability, while failure statistics are a necessary feedback link and need constant accumulation and updating of information to improve the product, and to predict its behavior in specific operating conditions, depending on the prevalence of physical destruction processes of various nature.

Keywords: reliability, durability of the material, durability of joints, operation and repair of products, repair and restoration technologies, design calculation.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что надежность изделия определяется прежде всего его долговечностью и безотказностью. При оценке такого показателя долговечности как ресурс для сложного изделия применяются в первую очередь показатели, описывающие выход его рабочих характеристик за допустимые пределы, например, понижение прочностных свойств соединений элементов конструкций в зависимости от технологии их изготовления [7].

Для начала рассмотрим наиболее прямой метод сохранения исходных прочностных свойств типовых болтовых соединений - методику испытаний соединений двух контрастных по свойствам композиционных материалов, полученные результаты были учтены при разработке указаний по эксплуатации соответствующих изделий для обеспечения ресурса соединений сравнимого с ресурсом применяемых материалов [1,2].

Проведенный эксперимент показал, что стабильность затяжки может существенно повысить прочность соединения.

Исследовался углепластик КМУ-4Л структуры $90^\circ / 0^\circ_3 / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ_3 / 90^\circ$, изготовленный методом прямого прессования при температуре 160°C , давлении 490 кПа в течение 6 часов и состоящий из чередующихся слоев поверхностно обработанной на воздухе ленты ЛУ-П-0,2, пропитанной связующим ЭНФБ, и органопластик, изготовленный методом вакуумного формования при давлении 85 кПа, температуре 180°C в течении 6 часов и состоящий из чередующихся в соотношении 1:1 слоев ткани СВМ сатинового плетения и нитей СВМ, пропитанных связующим ЭДТ-10.

В результате испытаний (рис.1) моделей болтовых соединений пластин по схеме «ухо-вилка» построены поверхности напряжений (рис.2), соответствующие уровню разрушающей нагрузки F_p (M – момент затяжки, d/H , c/d , w/d – безразмерные параметры).

Объемы экспериментальных выборок составили 8...10 образцов. Статистическая обработка позволила заключить, что распределение характеристик прочности описывается нормальным законом, коэффициенты вариации при испытаниях не превышали 15 %.

Предварительная затяжка ($M=20\text{ Нм}$, $M=40\text{ Нм}$) существенно повышает несущую способность за счет конструктивного усиления зоны крепежа. Обеспечение стабильности затяжки в процессе эксплуатации позволяет гарантировать требуемый ресурс соединения, соответствующий долговечности используемых материалов. При повышенных требованиях к надежности, в частности, при разработке ремонтно-восстановительных технологий ответственных сотовых элементов конструкций, необходимо обеспечить восстановленным деталям такой же ресурс, как у новых деталей.

Методика восстановительного ремонта обшивок сотовых элементов предполагает удаление поврежденных частей обшивок. При этом сотовая часть либо укрепляется заливкой полимерной композиции с прокладками из стеклоткани, либо заменяется (полностью или частично) при помощи пенополиуретановых вставок, после чего ремонтная зона укрепляется либо металлическими, либо слоистыми металлопластиковыми накладками (рис.3) с помощью клеевого соединения и механического крепежа (заглушек или сквозных штырей, связывающих обе несущие поверхности сотовой конструкции).

Рис.1. Приспособление для испытаний моделей болтовых соединений конструктивных элементов из композиционных материалов: 1- нагружающая вилка, 2 – втулка с постоянным наружным и переменным внутренним диаметрами, 3- болт, 4 – гайка, 5 – испытываемый образец.

Рис.2. Поверхности прочности в напряжениях σ - брутто для болтового соединения деталей из десятислойных углепластика (а) и органоластика (б).

В расчетном анализе принимается допущение, что несущая обшивка работает на растяжение-сжатие, а сотоблок обеспечивает монолитность конструкции, следовательно, оценка прочности зоны восстановления может быть сведена к оценке прочности ее наиболее слабого звена – клеевой прослойки между ремонтной накладкой и несущими листами обшивки (рис.4).

Проектный расчет. Для поврежденной обшивки в качестве проектного расчета целесообразно использовать базирующийся на модели составного стержня метод анализа многослойных соединений [1,3]. Касательные напряжения в i -ом клеевом слое ($i = 1, 2$) определяются из условия равновесия отсеченной части составного стержня (рис.5):

$$(1)$$

где σ_k - нормальные напряжения в обшивке и накладке ($k=1,2$), A_0, A_1, A_2 - площади сечений обшивки и слоистой накладки, b_1, b_2 - размеры накладных слоев по ширине, E_0, E_1, E_2 - соответствующие значения модуля упругости.

Данный метод позволяет достаточно точно определить размер зоны передачи усилий в накладке и область ее стабильной работы.

Уточненные расчеты. Для рационального выбора конструктивных параметров соединения (скос кромок, местоположение механического крепежа,...) воспользуемся результатами анализа напряженно-деформированного состояния клеевого соединения переменной жесткости [1], когда для модели составного стержня принимается, что соединительная прослойка работает на сдвиг и отрыв (рис.6). При численной реализации применялся метод ортогональной прогонки.

Расчеты показывают, что скос кромок приводит к уменьшению касательных напряжений на 40...50 %, а нормальных (отрывных) – на 50...60%, при этом размер зоны передачи усилий меняется незначительно. Механический крепеж следует размещать за зоной передачи усилий (параметр m на рис.6).

Для уточнения характера распределения напряжений по ширине соединения [1] была использована конечно-элементная модель соединения двух пластин, в которой соединительная прослойка (работающая на сдвиг) моделировалась при помощи специальных сдвиговых конечных элементов СКЭ (рис.7).

Рис.3. Конструктивные схемы восстановительного ремонта сотовых элементов конструкций при частичной (а) и полной замене (б) части сотоблока: 1 – часть отсека хвостового звена закрылка, 2 – накладка, 3 – вставка сотозаменителя, 4 – нижняя накладка.

Рис.4. Схема нагруженности и расчетного моделирования зоны восстановительного ремонта типовой сотовой конструкции: 1- величина нахлестки, n- область скоса кромок, m - зона передачи усилий, k-зона механического крепежа; 1- поврежденная зона, 2 – усиливающая накладка.

Рис.5. Расчетные схемы двухслойного (а), трехслойного (б) и ступенчатого стержня (в); распределение касательных напряжений в полимерном связующем (г) для случая а (сплошная линия, $E_0=E_1=7 \cdot 10^4$ МПа), для случая б (τ_1, τ_2 - пунктир, $E_0=E_2=7 \cdot 10^4$ МПа, $E_1=3 \cdot 10^4$ МПа). Толщина клеевых прослоек 0,1 мм, $G=0,4 \cdot 10^4$ МПа.

a)

б)

Рис.6. Расчетная схема комбинированного клее-механического соединения - а; распределение касательных и отрывных напряжений в соединительной прослойке по длине клееварного соединения ($m = 2,5$ мм), пунктир – скошенные кромки, - б.

Рис.7. Расчетная схема и характер распределения касательных напряжений по ширине пластины: $l/B = 0,75$, $H_1=H_2$, $H_1/\delta=20$, $F = 9$ кН, $E = 3,15 \cdot 10^3$ МПа, $E_1=E_2 = 7,1 \cdot 10^4$ МПа. Использовано (для половины соединения) 230 плоских и 84 сдвиговых КЭ.

Расчеты показывают, что к боковым торцам уровень напряжений повышается примерно на 15 %. Поэтому при восстановительном ремонте рекомендовано применять накладки по форме близкие к окружности, а их линейные размеры увеличивать на 20 % [1].

Проверочные расчеты. Для оценки надежности монолитности ремонтной зоны оценивался возможный эффект расслоения в полимерном связующем при возникновении либо поверхностных, либо сквозных трещин в окрестности отверстия под механический крепеж (рис.8).

Для сотовблока анализировались два уровня нагрузки в обшивке – 30 и 300 МПа, что в последнем случае соответствует трехкратному превышению расчетной нагрузки. При моделировании использовалось 342 плоских и 276 двухузловых конечных элементов.

Расчеты показали, что при нагрузке $\sigma = 30$ МПа ни поверхностные, ни сквозные трещины не вызывают расслоение в полимерном связующем, при нагрузке $\sigma = 300$ МПа поверхностные трещины также не инициируют расслоение клея, сквозные же трещины ведут к разрушению полимерного связующего, что следует учитывать при отработке технологии ремонта в конкретных заводских условиях.

Рис.8. Расчетная область при моделировании развития трещины от начальной величины $2c = 20$ мм – а; б - экспериментальная реализация развития дефекта при двух значениях параметра C в уравнении Пэриса.

Оценка долговечности самих усиливающих накладок проводилась также с помощью конечно-элементного моделирования. При этом для поврежденного листа оценивался основной параметр разрушения – коэффициент интенсивности напряжений – K . Применяемый при этом энергетический метод виртуального роста трещины дает необходимую точность при относительно грубой сетке конечно-элементного моделирования. При этом:

$$-\{q\}^T (-) \{q\}, \quad (2)$$

где Π – потенциальная энергия конструкции с трещиной длиной $2c$ и коэффициентом интенсивности напряжений – K , $E' = E$ – модуль упругости металлического листа при плоском напряженном состоянии; $E' = E / (1 - \nu^2)$, ν – коэффициент Пуассона, при плоскодеформированном состоянии; $\{q\}$ – матрица искомых узловых перемещений в конечно-элементной модели; dQ/dc – производная от глобальной матрицы жесткости конструкции; t – знак транспонирования.

В расчетах эффект растрескивания моделировался постепенным исключением «разрушенных» конечных элементов (с учетом перераспределения нагрузок из-за локального изгиба в зоне трещины), рост трещины усталости определялся из уравнения Пэриса:

$$-\Delta K, \quad (3)$$

Где ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений, C и a – параметры материала, N – число циклов нагружения.

Конечно-элементная сетка строилась для четверти пластины (использовано 8 треугольных, 402 четырехугольных и 239 сдвиговых конечных элементов).

Экспериментальная апробация данной расчетной методики проводилась на слоистых металлопластиковых образцах, при этом в слоях из алюминиевого сплава толщиной 0,5 мм разрушение проходило путем отрыва (склейка в автоклавном режиме клеем ВК-41) при пульсирующем цикле нагружения с частотой $f = 50$ Гц и напряжении $\sigma = 100$ МПа. Данные испытаний позволили обоснованно принять значения констант a и C в (3) и рекомендовать

характерный размер привершинных конечных элементов 0,3...0,5 мм, а величину виртуального сдвига трещины – 0,001 мм.

Расчеты показали, что для прорастания трещины в обшивке сквозь усиливающую накладку необходимо более $2 \cdot 10^5$ циклов нагружения, что существенно превышает требования к долговечности восстановленных сотовых конструктивных элементов.

Оценка долговечности наиболее слабого звена ремонтной зоны, а именно полимерного связующего проводилась на основе динамической модели взаимодействия двух стержней [1,4]. Для описания механики дифференциального элемента соединения и полимерного связующего использовалась вязко-упругая модель Максвелла (рис.9). Соответствующая система динамических уравнений равновесия в перемещениях для стержней переменной жесткости интегрировалась с использованием метода конечных разностей [4].

Для оценки долговечности вначале определялось наиболее опасное сечение и в нем строились зависимости компонент тензора напряжений от времени. Условие прочности клеевой прослойки при действии отрывных $\sigma(t)$ и срезающих напряжений $\tau(t)$ принималось по методике Когаева В.П.[1]. При этом на основе понятия об эквивалентном напряжении рассчитывалась долговечность λ в одном блоке нагружения путем анализа числа циклов повторения амплитуд σ_i, τ_i всех уровней и известных параметрах прямолинейных участков кривых усталости полимерного связующего:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \quad (4)$$

где σ_i, τ_i – пределы ограниченной выносливости клеевого соединения.

Общий ресурс соединения (в циклах, во времени):

$$L = \lambda \cdot l \quad (5)$$

где l – продолжительность одного блока нагружения.

Учет нерегулярности характера нагружения проводился по скорректированной гипотезе суммирования повреждений, когда в расчетном сечении возникали либо только касательные, либо нормальные напряжения

$$\frac{1}{N} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^{m_\sigma} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\tau_j}{\tau_0} \right)^{m_\tau} \quad (6)$$

Где N , N_i – долговечности от действия нормальных, касательных напряжений, m_σ, m_τ – параметры прямолинейных участков соответствующих кривых усталости в полулогарифмических координатах.

Апробация данной методики на жестких эпоксидных клеях R 391/1 показала, что расчетные данные по долговечности близки к экспериментальным при учете непрочности в соединении (до 30% площади склейки).

Расчеты для зоны восстановительного ремонта сотовой конструкции показали, что долговечность (в зависимости от наличия или отсутствия скола кромок) при нагрузке $\sigma = 60$

МПа колеблется в пределах от $4 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^6$ циклов.

a)

б

в

Рис.9. Дифференциальный элемент трехслойного стержня – а; изменение во времени напряжений в левом краевом сечении в клее и в месте механического крепежа размером $d=5$ мм на расстоянии 5 мм от торца; $G_{св}=2,64 \cdot 10^4$ МПа, параметры полимера $E = 350$ МПа.

200 МПа, толщина $\delta = 0,5$ мм; $\sigma_{\text{вын}} = 49$ МПа, частота $\omega = 62,8 \text{ с}^{-1}$ - б; в соединении со скошенными кромками $2H(6) = 0,5\text{мм}$, $2H(7) = 1\text{мм}$, $2H(8) = 1,5 \text{ мм}$.

Основная экспериментальная проверка технологии ремонта проводилась путем испытаний образцов – свидетелей, вырезанных из тормозных щитков и закрылков Ил-76 Т на статическую и циклическую прочность по программе предприятия изготовителя.

Образцы – свидетели как бездефектные, так и отремонтированные выдержали нагрузку в среднем в 3,8 раза превышающую программную.

Долговечность превысила требуемый ресурс в 2,7 раза.

Испытания на повторную статику показали, что отремонтированные и бездефектные образцы выдержали программные режимы ($4,5 \cdot 10^4$ циклов) без появления повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение надежности конструкций и их составляющих не является самоцелью, а скорее средством достижения эффективности функционирования оборудования. Уровень надежности оборудования прямо пропорционален количеству и качеству затрат на его создание или ремонт. Иными словами, с увеличением базовой надежности затраты на создание оборудования возрастают.

В целом можно отметить, что современная техника особо нуждается в достоверной оценке надежности. Для этого при определении запаса надежности по конкретному физическому параметру в вероятностной трактовке необходимы специальные испытания, для получения знаний по описанию изменений начальных свойств изделий в процессе эксплуатации. Поэтому представленная выше комплексная методика прочностного расчетно-экспериментального исследования типовых соединений может служить методологической базой таких работ в плане построения дорожной карты необходимых экспериментальных и расчетных мероприятий.

Литература:

1. Семин М.И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность.- МАДИ, 2016.-92 с.
2. Семин М.И., Карелина М.Ю. Особенности проектирования болтовых соединений слоистых композитов // 7 МНПК «Современные концепции научных исследований». - №7. -2014. -С. 130-133.
3. Мартышев В.П. Исследование напряженного состояния клеевых соединений авиаконструкций с учетом пластических свойств связующего// Авт-т дисс. на соиск. Уч. ст. к.т.н. – Казань, КАИ, 1974.-21с.
4. Семин М.И., Турчинский Л.А. Методика расчета долговечности клеевых соединений при динамическом нагружении// Проблемы прочности. - 1985. - №9. - С.92-97.
5. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности// - М.: Абрис, 2012. – 390 с.
6. Беленков Ю.А., Нейман В.Г., Селиванов М.П., Точилин Ю.В. Надежность объемных гидроприводов и их элементов. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.
7. Пронин А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник, Т.10 «Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности». –М.: Машиностроение, 1990. – 330 с.
9. Надежность и эффективность в технике: Справочник, Т.8 «Эксплуатация и ремонт». – М.: Машиностроение. 1990. – 320 с.

10. Надежность и эффективность в технике: Справочник, Т.7 «Качество и надежность в производстве». –М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.

References:

1. Semin M.I. *Calculations of compounds of structural elements from polymer materials for strength and durability*, MADI, 2016, 92 p.
2. Semin M.I., Karelina M.Yu. *Design features of bolted joints of layered composites*, 7 MNPK "Modern concepts of scientific research", 2014, no. 7, pp. 130-133.
3. Martyshev V.P. *Investigation of the stress state of the adhesive joints of aircraft structures, taking into account the plastic properties of the binder*. Kazan, KAI Publ., 1974, 21 p.
4. Semin M.I., Turchinsky L.A. Methodology for calculating the durability of adhesive joints under dynamic loading. *Problems of strength*, 1985, no. 9, pp. 92-97.
5. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statistical models in the theory of reliability*. Moscow, Abris Publ., 2012, 390 p.
6. Belenkov Yu.A., Neiman V.G., Selivanov M.P., Tochilin Yu.V. *Reliability of volume hydraulic drives and their elements*. Moscow, Mechanical Engineering, 1977, 167 p.
7. Pronin A.S. *Reliability of cars*, Moscow, Mechanical Engineering, 1978, 592 p.
8. *Reliability and efficiency in technology: Reference, T.10 "Reference data on operating conditions and reliability characteristics"*, Moscow, Engineering, 1990, 330 p.
9. *Reliability and efficiency in technology: Handbook, T.8 "Operation and repair"*, Moscow, Mechanical Engineering. 1990, 320 p.
10. *Reliability and efficiency in technology: Handbook, T.7 "Quality and reliability in production"*, Moscow, Engineering, 1989, 280 p.

Submitted: 05 September 2019

Accepted: 08 October 2019

Published: 10 October 2019