

## Анализ методов повышения усталостной долговечности зон конструктивных нерегулярностей хвостовой балки вертолета транспортной категории

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Выполнен анализ методов повышения усталостной долговечности зон конструктивных нерегулярностей авиационной техники, которые целесообразно применять при проектировании высокоресурсных хвостовых балок винтокрылых летательных аппаратов транспортной категории.

**Ключевые слова:** вертолет, хвостовая балка, усталостная долговечность, нерегулярные зоны.

Повышение усталостной долговечности авиационной техники (АТ), в том числе винтокрылых летательных аппаратов, является одной из основных проблем современного авиастроения. Решение этой проблемы необходимо выполнять комплексно – на стадиях проектирования, производства и эксплуатации изделия.

Конструкции планеров АТ, спроектированных по принципу безопасной повреждаемости или эксплуатируемые по техническому состоянию, должны иметь достаточные живучесть и ресурс при наличии в их элементах усталостных трещин докритической длины [1]:

$$T = \frac{N_{д.п.тр}}{\eta} + \frac{N_{стр}}{\eta_{тр}}, \quad (1)$$

где  $N_{д.п.тр}$  – долговечность до появления трещины;  $N_{стр}$  – долговечность с момента образования трещины до разрушения конструкции;  $\eta$ ,  $\eta_{тр}$  – коэффициенты надежности.

К настоящему времени для решения проблемы обеспечения достаточных живучести и ресурса АТ, спроектированной по принципу безопасной повреждаемости, разработаны методы и проведены расчётно-экспериментальные исследования длительности роста усталостных трещин. Кроме того, рассмотрены вопросы остаточной прочности конструкций с обширными усталостными повреждениями; разработаны методики повышения сопротивления усталости и живучести конструкций ЛА, конструктивно-технологические методы обеспечения и повышения ресурса конструкций АТ [1].

Основные требования относительно обеспечения ресурса винтокрылых аппаратов транспортной категории изложены в авиационных правилах АП-29 «Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории».

Оценка прочности основных элементов, конструктивных особенностей отдельных мест и технологии производства должна показать, что не будет катастрофического разрушения из-за усталости, с учетом влияния внешней среды, характерных дефектов или случайных повреждений [2].

Как показывает практика эксплуатации и ресурсных испытаний авиационных конструкций, усталостная долговечность соединений элементов планера определяется сопротивлением усталости конструкционных материалов (полуфабрикатов), уровнем расчетных напряжений, спектром полетных и

наземных нагрузок, а также уровнем и качеством конструктивно-технологической проработки принятых при проектировании вариантов отдельных узлов, агрегатов и элементов [3].

Создание высокоресурсных и экономичных конструкций включает в себя рациональное конструирование элементов, обеспечивающее максимально возможное снижение уровня концентрации напряжений, особенно в наиболее циклически нагруженных участках силовой конструкции. Этапы обеспечения ресурса современных авиаконструкций содержат:

- 1) выбор материала с учетом специфики работы в конструкции;
- 2) отработку усталостной долговечности регулярных зон конструкции;
- 3) отработку нерегулярных зон конструкции на конструктивных образцах, натуральных элементах, панелях, узлах и агрегатах расчетно-экспериментальными методами с учетом требуемых характеристик сопротивления усталости.

Таким образом, должен быть определен перечень зон конструкции хвостовой балки (ХБ) вертолета, долговечность которых определяет долговечность ХБ в целом.



Рис. 1. Типичные регулярные зоны конструкции хвостовых балок вертолетов транспортной категории

Регулярные зоны ХБ (рис. 1) – продольные швы, стыки обшивки ХБ. Ресурс регулярных зон обеспечивается выбором допускаемых напряжений по условиям усталостной долговечности, живучести и остаточной прочности.

На основе анализа конструкций хвостовых балок вертолетов транспортной категории, выполненного в работе [4], были выделены основные зоны с наибольшей вероятностью усталостного разрушения – нерегулярные зоны.

К нерегулярным зонам (рис. 2) относят участки конструкции с повышенной концентрацией напряжений: элементы с разъемными болтовыми соединениями; зоны конструктивных разрезов (места соединения ХБ с центральной частью фюзеляжа (ЦЧФ) и килевой балкой); элементы с вырезами, отверстиями, узлами крепления хвостового вала трансмиссии, узлами крепления стабилизатора; поперечные стыки листов обшивки, участки обшивки в зонах окончания стрингеров; места установки усиливающих накладок; поперечные стыки стрингеров; участки конструкции с локальным приложением нагрузок.

В работе [5] представлен обзор зон хвостовых балок вертолетов Ми-26Т, в которых обнаружены усталостные трещины при эксплуатации.

Дефектами поперечного набора концевой секции ЦЧФ (шпангоут № 36 - 41) и хвостовой балки являются следующие (рис. 3):

- трещины накладок стыка левой и правой боковин;
- трещины внутреннего уголкового профиля усиленного шпангоута № 5 (на нем размещена опора хвостового вала);
- трещины нижней стенки разрезного шпангоута № 12.

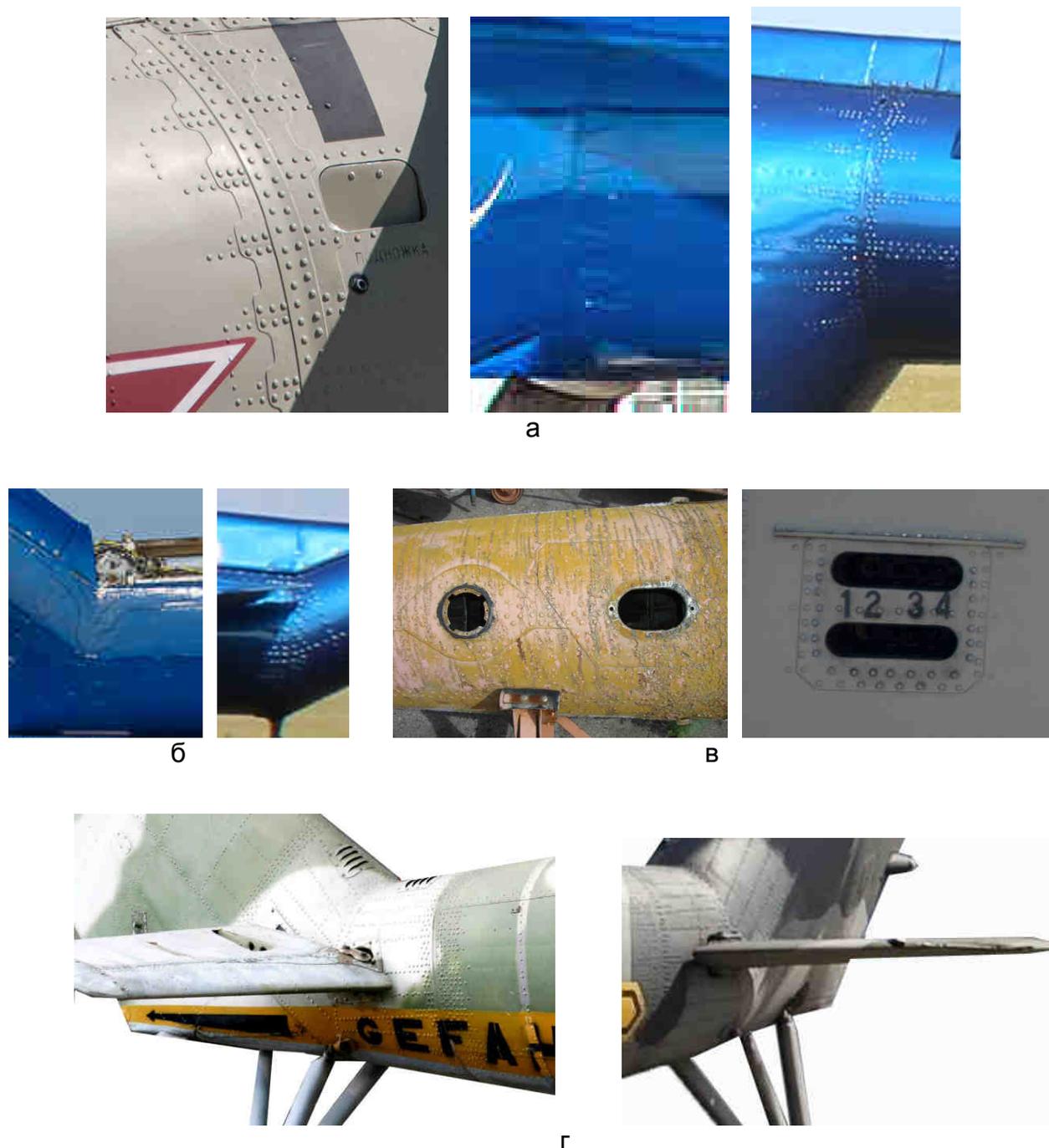


Рис. 2. Типичные нерегулярные зоны конструкции хвостовых балок вертолетов транспортной категории: а – зона соединения ХБ с центральной частью фюзеляжа; б – зона соединения ХБ с килевой балкой; в – элементы с вырезами; г – элементы с узлами крепления стабилизатора

На рис. 4 показан характер усталостного разрушения, обнаруженного в районе технологического стыка ЦЧФ с хвостовой балкой по шпангоуту № 41/1 в районе заклепочного соединения в зоне между стрингерами № 3 по левому и правому бортам.

Наиболее массовым дефектом силового набора ХБ вертолета Ми-26Т являются трещины в стрингерах (рис. 5) – трещины, развивающиеся от отверстия под заклепку и выходящие на край свободной полки стрингера.



Рис. 3. Характер развития трещины шпангоутов хвостовой балки:  
а – внутренний угловой профиль шпангоута № 5 ХБ;  
б – нижняя стенка шпангоута № 12 ХБ



Рис. 4. Характер развития трещины обшивки в районе стыка ЦЧФ и ХБ  
(вид изнутри)



Рис.5. Характер развития трещины стрингеров – трещины от отверстия под заклепку

Исходя из данных [5] наибольшее количество обнаруженных в эксплуатации трещин в хвостовой балке Ми-26Т наблюдается в районе стыка ЦЧФ с ХБ.

Таким образом, появление усталостных трещин в процессе эксплуатации и при проведении натурных испытаний подтверждает **актуальность** разработки новых конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности заклепочного соединения силовых элементов в районе соединения ЦЧФ и ХБ.

**Целью** данной работы является анализ методов повышения усталостной долговечности зон конструктивных нерегулярностей АТ, которые было бы целесообразно применять при проектировании высокоресурсных хвостовых балок винтокрылых летательных аппаратов транспортной категории.

Анализ работ [3, 6, 7] показал, что усталостная долговечность конструктивных элементов планера определяется характером и уровнем их эксплуатационной нагруженности, конструктивно-технологическими параметрами, усталостными характеристиками применяемых материалов, характеристиками локального напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в зонах их вероятного усталостного разрушения, технологией обработки силовых элементов в зоне отверстий под крепеж.

К конструктивным факторам, которые влияют на усталостную долговечность заклепочных соединений, относят:

- 1) число плоскостей среза;
- 2) число рядов крепежных элементов;
- 3) распределение нагрузки по рядам соединений;
- 4) материал соединяемых элементов (листов);
- 5) отношение диаметра крепежа к толщине листа;
- 6) взаимное влияние крепежных элементов;
- 7) расстояние от центра крайнего крепежного элемента до края листа;
- 8) конструкция применяемых заклепок;
- 9) использование герметика [3].

В результате проведенных испытаний образцов пластин с заполненными незагруженными отверстиями с внутришовным герметиком У30МЭС-5М, выполненных потайными заклепками ОСТ 1 34100-80 и заклепками с плоско-скругленными головками ОСТ 1 34078-85 получено, что усталостная долговечность образцов с потайными заклепками с образованием гнезд под закладные головки подштамповкой в 1.6 раза выше усталостной долговечности образцов соединений с заклепками, имеющими плоско-скругленную закладную головку [7].

Испытания образцов проведены на машине для испытаний на усталость металлических образцов при растяжении-сжатии УРМ-2000 на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 30$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 130$  МПа с частотой нагружения 40 Гц.

К технологическим факторам, которые влияют на усталостную долговечность заклепочных соединений, относят:

- 1) степень осадки замыкающей головки заклепки;
- 2) способ выполнения отверстия;
- 3) глубина зенкования;
- 4) состояние поверхностного слоя соединяемых листов.

Способ и технология клежки также существенно влияют на ресурс заклепочных соединений и качество их внешней поверхности.

Для повышения усталостной долговечности и ресурса планера специалистами авиационной промышленности разработан ряд конструктивных и технологических способов.

К конструктивным способам относятся: выбор рационального диаметра отверстий, их взаимного расположения; выбор параметров местного утолщения соединяемых элементов; рациональное расположение отверстий на нагруженных элементах конструкции; величина натяга крепежного элемента.

Большинство существующих технологических методов заключается в создании различными способами остаточных напряжений в зоне отверстий путем пластического деформирования металла.

Таким образом, разработка новых типов заклепок, технологии их установки, методологии их интегрированного проектирования и моделирования, методов прогнозирования их долговечности с помощью компьютерных интегрированных систем остается актуальной задачей [1].

Для достижения заданных характеристик усталостной долговечности специалистами авиационной промышленности разработаны более эффективные методы обработки, в частности методы местного глубокого пластического деформирования (МГПД) стенок отверстий и зон, прилегающих к ним.

Местное усиление (компенсация) зон отверстий дает положительный эффект, но существенно усложняет технологию изготовления конструктивных элементов планера и, как правило, требует применения дополнительных технологических способов обработки элементов в зоне отверстий.

Перечисленные выше конструктивно-технологические решения для заклепочных соединений сборных тонкостенных конструкций АТ внедрены на отечественных авиационных предприятиях и способствуют повышению качества внешней поверхности этих соединений, их герметичности и ресурса.

Применение численных методов анализа эффективности различных МГПД в зоне заклепочных соединений, в частности метода конечного элемента, реализованного в системе инженерного анализа ANSYS, позволяет проводить численные эксперименты, близкие к условиям натуральных испытаний. С помощью численных методов можно исследовать влияние различных параметров (как конструктивных, так и технологических) на характеристики локального напряженно-деформированного состояния (НДС), сравнить различные варианты расчетов и прогнозировать изменения характеристик сопротивления усталости заклепочных соединений.

Необходимо исследовать с помощью численного анализа эффективность применения МГПД стенок отверстий заклепочного соединения силовых элементов в районе соединения ЦЧФ и ХБ, рассчитать характеристики локального НДС с учетом реального нелинейного поведения материала, контактного взаимодействия технологического инструмента с участками детали и учета нагружения конструкции. Для этого необходимо:

- 1) с помощью системы ANSYS создать параметрическую конечно-элементную нагруженную модель заклепочных соединений силовых элементов ХБ. Такая модель обеспечит комплексное исследование локального НДС в окрестности отверстия под заклепку;

- 2) провести сравнительные расчеты модели без предварительного обжатия отверстия и с предварительным обжатием; проанализировать влияние процесса обжатия отверстий под заклепочное соединение на прочность и определить оптимальную величину обжатия, при которой образуемое поле остаточных

напряжений приведет к снижению максимальных напряжений под действием эксплуатационных нагрузок;

3) исследовать влияние типа заклепок и технологических отклонений при выполнении соединений на характеристики усталостной долговечности;

4) по результатам исследований выбрать параметры заклепочных соединений силовых элементов ХБ с улучшенными характеристиками усталостной долговечности;

5) разработать технологию выполнения высокоресурсных заклепочных соединений силовых элементов ХБ, обеспечивающую заданные ресурсные характеристики.

### **Выводы**

Проведен анализ современных конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности заклепочных соединений силовых элементов хвостовой балки вертолета транспортной категории.

Для повышения ресурса хвостовой балки целесообразно разработать новые научно обоснованные конструктивно-технологические методы повышения усталостной долговечности заклепочного соединения силовых элементов хвостовой балки с учетом влияния конструктивных и технологических параметров.

### **Список литературы**

1. Богуслаев, В.А. Научные основы конструктивно-технологических методов обеспечения ресурса авиационной техники [Текст]: моногр. / В.А. Богуслаев, А.Г. Гребеников, Н.И. Москаленко и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им.Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2017. – 292 с.

2. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. Авиационные правила. – Ч.29.

3. Воробьев, А.З. Соппротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А. З. Воробьев, Б. И. Олькин, В. Н. Стебнев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

4. Гребеников, А.Г. Анализ конструктивно-технологических особенностей хвостовых балок вертолетов транспортной категории вертолета [Текст] / А. Г. Гребеников, М. Н. Орловский, Ю. Ю. Высочанская // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб.науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им.Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 70. – Х., 2015. – С. 54 – 69.

5. Осипов, Д.Н. Методика поддержания летной годности вертолетов Ми-26Т по условиям прочности конструкции [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д.Н.Осипов. – М., 2014. – 200 с.

6. Семенцов, В.Ф. Анализ конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий [Текст] / В.Ф. Семенцов // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 82 – 93.

7. Гребеников, В.А. Влияние типа заклепок на усталостную долговечность образцов заклепочных соединений пластин с заполненными незагруженными отверстиями [Текст] / В.А. Гребеников, А. К. Мялица, А. М. Гуменный и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии:

сб.науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 76. – Х., 2017. – С. 119 – 125.

Поступила в редакцию 18.12.2017

## **Аналіз методів підвищення втомної довговічності зон конструктивних нерегулярностей хвостової балки вертольота транспортної категорії**

Виконано аналіз методів підвищення втомної довговічності зон конструктивних нерегулярностей авіаційної техніки, які доцільно застосовувати при проектуванні високоресурсних хвостових балок гвинтокрилих літальних апаратів транспортної категорії.

**Ключові слова:** вертоліт, хвостова балка, втомна довговічність, нерегулярні зони.

## **Analysis of Methods Increasing Fatigue Life of Constructive Irregularities Zones of the Tail Boom of a Transport Category Helicopter**

Analysis of methods increasing fatigue life of constructive irregularities zones of aviation technics which are advisable to use in the design of high-resource tail booms of a transport category helicopter was performed.

**Key words:** helicopter, tail boom, fatigue life, irregular zones.

### **Сведения об авторах:**

**Гребеников Александр Григорьевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Орловский Михаил Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Высочанская Юлия Юрьевна** – аспирант кафедры 103 «Проектирование самолетов и вертолетов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.