

Научная статья
УДК 629.7.018.4
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184990>
EDN: <https://www.elibrary.ru/KBUMMP>



Устройство и способ оценки ресурса авиационных тросов на основе испытаний на разрывной машине

Артём Геннадьевич Агеев^{1✉}, Виктор Владимирович Козлов², Даниил Сергеевич Гарюнов³

^{1, 2, 3} АО «Туполев», Москва, Российская Федерация

¹ snaker-tema@mail.ru✉

² gdanil.s@mail.ru

³ vickt.kozloff@yandex.ru

Аннотация. В ходе работ по продлению ресурса тросов, устанавливаемых на изделиях дальней авиации, проведен анализ нормативной документации на авиационные тросы, на методы их испытаний, выявлены недостатки прокатных по ГОСТ 2387–80 машин для испытаний тросов на циклическое растяжение (выносливость). Проведены лабораторные дефектовочные исследования тросов с наработкой, построены диаграммы изменения диаметра троса по его длине.

Разработаны варианты переносного устройства по технической сущности, аналогичные прокатным машинам по ГОСТ 2387–80, позволяющие имитировать изгиб троса при его работе на роликах и его износ за счет возвратно–поступательного перемещения троса на роликах для приближения условий проведения испытаний к эксплуатационным.

Испытания для продления назначенного ресурса тросов проведены в возможно короткие сроки с трудоемкостью в 8 раз меньше прогнозируемой по прокатному стенду. Построены диаграммы рассеяния остаточной прочности, позволяющие спрогнозировать ресурс тросов до списания без необходимости визуального контроля и разрушения образцов, уменьшив время работы испытательного оборудования на 40%.

Ключевые слова: авиационный трос, система управления двигателями, испытания на выносливость, продление назначенного ресурса, остаточная прочность, разрывная машина

Для цитирования: Агеев А.Г., Козлов В.В., Гарюнов Д.С. Устройство и способ оценки ресурса авиационных тросов на основе испытаний на разрывной машине // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 47–55. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184990>

Original article

The Device and Method for the Aircraft Steel Ropes Assessing Based on the Tests with the Tensile Testing Machine

Artem G. Ageev^{1✉}, Viktor V. Kozlov², Daniil S. Garyunov³

^{1, 2, 3} Company “Tupolev”, Moscow, Russian Federation

¹ snaker-tema@mail.ru✉

² gdanil.s@mail.ru

³ vickt.kozloff@yandex.ru

© Агеев А.Г., Козлов В.В., Гарюнов Д.С., 2025

Abstract

With a view to the introduction of sanctions against Russia in recent years, including new aviation equipment supply, the issue of the aircraft and their associated items airworthiness maintaining in operation has become increasingly acute. An equally pressing problem is the increase and service life extension of the steel ropes, which are being employed, in particular, in the engine control systems, as well as the transfer of the steel ropes to the method of technical operation by the condition instead of operation by the service life.

Laboratory defective studies of rope, static tension tests according to State Standard 2172-80 on a tensile testing machine and cyclic tension according to State Standard 2387-80 on a rolling test bench, based on the results of trial operation of leading and main objects, are being conducted to extend their service life.

In the course of the work on extending the service life of the steel ropes installed on long-range aviation products, an analysis of regulatory documentation for the aircraft steel ropes and their testing methods was performed, and deficiencies in rolling machines for cyclic tension testing of the steel rope according to State Standard 2387-80 were identified. Laboratory defect testing of the steel rope with operating time was conducted, and diagrams of cable diameter change along its length were plotted.

Variants of a portable device similar in technical essence to the rolling machines according to State Standard 2387-80 were developed, allowing simulate the steel rope bending during its operation on rollers and its wear due to the reciprocating movement of the steel rope on rollers to approximate the test conditions to operational ones. Development of the device, which allow to conducting endurance tests of the aircraft steel rope on a tensile testing machine opens possibility to abandon the design, production and certification of a separate rolling test benches according to State Standard 2387-80.

To reduce the test equipment operating time, the tests were not conducted until the rope breakage, but until a specified number of loading cycles, which correspond to the number of engine control lever response cycles for the designated service life of the aircraft, were achieved.

The tests for extending the designated service life of the steel rope were performed in the shortest possible time with a labor intensity eightfold less than that predicted for the rolling test-bench. It allowed ensuring urgent duty of the AT products without the need to put the products in operation for repair and perform a labor-intensive operation to replace the steel rope cable run. The tests were conducted at the Moscow site of the JSC Tupolev without transferring this volume of work to the third-party organizations and to other regions of the Russian Federation, which will allow employing the created production reserve for the future service life tests and studies.

Processing of the endurance test results was reduced to the compliance determining of the set of obtained test results with the normal distribution law with the known methods of mathematical statistics by checking the equality of standard deviations using the F-test and checking the equality of average values by the Student's t-test. Scatter diagrams of residual strength, allowing predict the service life of the steel rope prior to the write-off without the need for visual inspection and destruction of the samples, reducing the operating time of the testing equipment by 40% were plotted.

Keywords: aircraft steel rope, engine control system, endurance tests, extension of the service life, residual strength, tensile testing machine

For citation: Ageev A.G., Kozlov V.V., Garyunov D.S. The Device and Method for the Aircraft Steel Ropes Assessing Based on the Tests with the Tensile Testing Machine. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):47-55. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184990>

List of Figures

Fig. 1. The hauling-wire-rope system for aircraft engine control

Fig. 2. Laboratory defect detection studies

Fig. 3. A device for the steel rope bending imitation

Fig. 4. Design detailing of the device for of a steel rope the bending imitation

Fig. 5. The steel rope samples breaking strength analysis

Введение

Поддержание летной годности отечественных изделий гражданской и специальной авиации — основа безопасной эксплуатации воздушных судов [1–4].

В связи с введением в последние годы против России санкций, в том числе на поставку новых

изделий авиационной техники (АТ), все более остро стоит вопрос о поддержании летной годности находящихся в эксплуатации воздушных судов по результатам контроля ресурсного состояния самолета в целом и его комплектующих изделий, в частности [5–6]. Кроме того, не менее актуальной проблемой

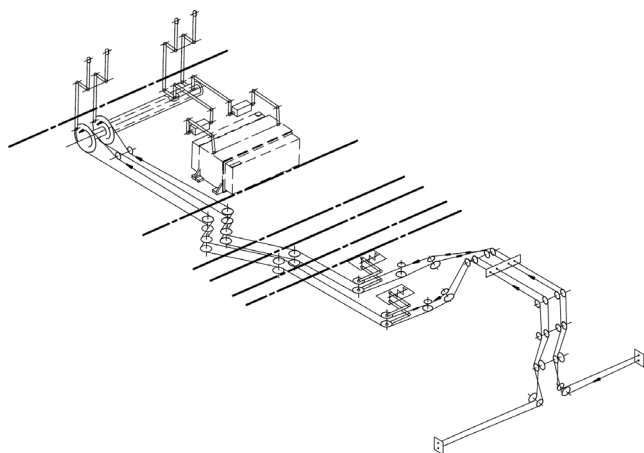


Рис. 1. Тяго-тросовая система управления двигателями

является увеличение и продление ресурса стальных тросов, которые, в частности, используются в системах управления двигателями (рис. 1), а также перевод тросов на метод технической эксплуатации по состоянию (ТЭС) вместо эксплуатации по ресурсу (ТЭР), что решается посредством выпуска ресурсного бюллетеня [7–9].

Изначально тросам задается метод эксплуатации по ТЭР, а ресурс соответствует ресурсу самолета до первого капитального ремонта. Основной целью внедрения ТЭС изделий АТ является сокращение затрат на эксплуатацию и заключается в максимальном использовании запасов работоспособности конструкции на основе проведения в процессе эксплуатации необходимого контроля его технического состояния. Например, для тросов отказным состоянием может служить наличие обрывов нитей.

По результатам опытной эксплуатации лидерных и головных объектов для продления ресурса проводятся лабораторные дефектовочные исследования тросов, испытания на статическое растяжение по ГОСТ 2172-80 на разрывной машине и циклическое растяжение по ГОСТ 2387-80 на прокатном стенде для наиболее изношенных по результатам отбора образцов для определения запасов прочности и выносливости [10–13]. Анализ зарубежной нормативной базы показывает, что продление ресурса авиационных тросов проводится на аналогичных разрывной машине и прокатном стенде [14–15]. Однако в отличие от отечественных стандартов, после испытаний на выносливость, проводимых до обрыва первой нити, участки образцов, проходящие через ролики прокатной машины, подвергаются испытаниям на разрыв для определения остаточной прочности. При этом минимальное значение разрушающей нагрузки должно составлять половину от номинального значения остаточного напряжения троса, неподверженного ресурсным испытаниям.

При положительном результате испытаний тросам назначается новый ресурс. По результатам опытной эксплуатации лидерных и головных объектов с увеличенным ресурсом проводятся повторные испытания на циклическое и статическое растяжение и ставится вопрос о переводе метода технической эксплуатации с ТЭР на ТЭС тросов на всем парке испытываемого типа самолетов. В некоторых случаях, при аналогичности конструктивно-силовой схемы тяго-тросовой системы управления двигателями на самолетах разных типов, тросам изначально присваивается метод эксплуатации по ТЭС, на основании опыта эксплуатации изделий АТ.

Стальной трос имеет пространственно-спиральную структуру и состоит из нитей (проволок), которые заплетены между собой. Трос долго используется в рабочей среде, в которой действует такой фактор, как трение, и подвергается нагрузкам на растяжение и изгиб, а также действию переменной циклической нагрузки. Этот фактор приводит к износу малого диапазона длины троса, который контактирует с роликом. В эксплуатации будет иметь место усталость при истирании между контактирующими стальными проволоками из-за совместного действия износа при истирании и циклических нагрузок на растяжение и изгиб, что приводит к появлению и распространению трещин на поверхности стальных проволок и, в конечном счете, ведет к обрыву отдельных нитей, увеличивая возможность разрыва троса из-за усталости и сокращая период эксплуатации троса.

Цель и задачи

Цель работы — продление ресурса авиационных тросов в составе парка изделий АТ, находящихся на срочном дежурстве, в требуемые сроки для исключения необходимости постановки изделий на ремонт и проведения трудоемкой операции по замене тросовой проводки.

Задачи, решаемые для достижения указанной цели:

- анализ прокатных машин для испытаний стальных авиационных тросов на выносливость по ГОСТ 2387-80;
- разработка устройства, позволяющего проводить испытания на выносливость авиационных тросов не на прокатной машине по ГОСТ 2387-80, а на уже существующих универсальных разрывных машинах, используемых при испытаниях на разрыв по ГОСТ 2172-80;
- проведение испытаний на выносливость авиационных тросов на разработанном устройстве в возможно короткие сроки;
- продление ресурса стальным авиационным тросам в составе парка изделий.

Анализ недостатков прокатных машин для испытаний тросов на выносливость по ГОСТ 2387-80

Как уже говорилось ранее, для испытаний тросов на выносливость по ГОСТ 2387-80 по результатам лабораторных дефектовочных исследований из наиболее сильно изношенных участков тросов изготавливаются образцы.

Отбор образцов для лабораторного анализа проводится по результатам дефектации тросов при оценке технического состояния самолетов с максимальным налетом.

Лабораторный анализ включает в себя внешний осмотр и измерение основных параметров тросов, оценку их фактического состояния и соответствия требованиям технических условий и ГОСТ 2172-80. Измерения диаметра троса проводят по всей длине с шагом 10 см от одного конца заделки троса в наконечник до другого.

По полученным данным строятся канатограммы (рис. 2). На указанной диаграмме представлено изменение диаметра по длине троса системы управления двигателями для самолета с наработкой до первого капитального ремонта. При этом следует учитывать, что согласно ГОСТ 2172-80 номинальный диаметр новых тросов без наработки составляет $2,5 \pm 0,1$ мм. Участки троса, на которых отмечается максимальное отклонение показаний прибора, осматриваются под измерительной лупой с подсветкой. При этом оценивается степень потертости.

После лабораторных дефектовочных исследований тросы с наибольшим износом подвергаются испытаниям на статическое растяжение (разрыв). В соответствии с ГОСТ 2172-80 испытания проходят на разрывной машине.

Образец троса в заделке с наконечниками устанавливается между двумя зажимами разрывной машины, которые совершают поступательное движение на растяжение образца с плавным нагружением до разрушения образца.

Образцы для испытаний на статическое растяжение представляют собой отрезки наиболее

изношенных участков тросов системы управления двигателями с обжатыми наконечниками для их заделки в технологическую оснастку (верхний и нижний зажимы) разрывной машины для проведения испытаний.

По результатам статического растяжения фиксируют место разрушения образца и разрушающую нагрузку, которая должна соответствовать значениям по ГОСТ 2172-80.

Кроме испытаний на разрыв, часть образцов проходила испытания на циклическое растяжение (выносливость).

Испытания на выносливость для определения возможности продления ресурса в рамках данной работы планировалось проводить на машине, сконструированной по ГОСТ 2387-80.

Однако анализ конструкции указанных и аналогичных устройств выявил ряд существенных недостатков [16–20], а именно:

- невозможность исследования на выносливость образцов тросов под действием на них осевой нагрузки;

- отсутствие компенсации поперечных колебаний груза, вызванных вращательным движением грузового ролика

- необходимость разработки, изготовления и аттестации отдельного стенда для проведения испытаний на выносливость по ГОСТ 2387-80 в дополнение к уже существующей машине для испытаний тросов на статический разрыв.

При этом по выполненным расчетам трудоемкость выполнения работ была бы в восемь раз больше планируемой, а срок выполнения работ на десять месяцев позже требуемого, что недопустимо долго и экономически неэффективно в условиях обеспечения срочного дежурства изделий АТ и необходимости продления ресурса в требуемые сроки.

Вторым вариантом проведения испытаний на выносливость на прокатном стенде по ГОСТ 2387-80 является не разработка собственного стенда, а заключение договора на выполнение работ со сторонней аккредитованной организацией, имеющей соответствующий производственный задел. Однако такой подход имеет два существенных недостатка:

- невозможность полного контроля над ходом испытаний на выносливость образцов тросов, являющихся особо ответственными элементами и влияющих на безопасность выполнения полетов изделий АТ;

- финансовые затраты на проведение работ по договору, сопоставимые с разработкой устройства, предложенного в ходе дальнейшего исследования по данному проекту.



Рис. 2. Лабораторные дефектовочные исследования

Разработка устройства для проведения испытаний на выносливость авиационных тросов на разрывной машине

В связи с большими затратами на проектирование, производство и аттестацию отдельного стенда в виде прокатной машины для проведения испытаний на выносливость по ГОСТ 2387-80, необходимостью полного контроля за процессом испытаний в секторе механических исследований Московской площадки АО «Туполев» и возможностью использования испытательного оборудования для будущих исследований разработаны варианты переносных устройств, позволяющих проводить испытания на выносливость авиационных тросов на существующих разрывных машинах и по технической сущности аналогичные прокатной машине, сконструированной по ГОСТ 2387-80.

Для имитации изгиба троса при его работе на роликах предложена конструкция в соответствии с рис. 3 и 4.

Угол изгиба троса равен 90° , что обусловлено компоновкой системы на конкретном самолете. Кронштейны разработанного устройства выполнены из стали марки Ст3 для снижения стоимости и установлены в технологическую оснастку (зажимы) разрывной машины. Кроме того, разработаны варианты устройства с имитацией износа троса за счет его возвратно-поступательного перемещения на роликах для приближения условий проведения испытаний к эксплуатационным.

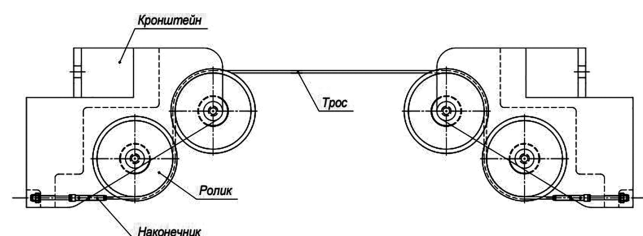


Рис. 3. Устройство для имитации изгиба троса

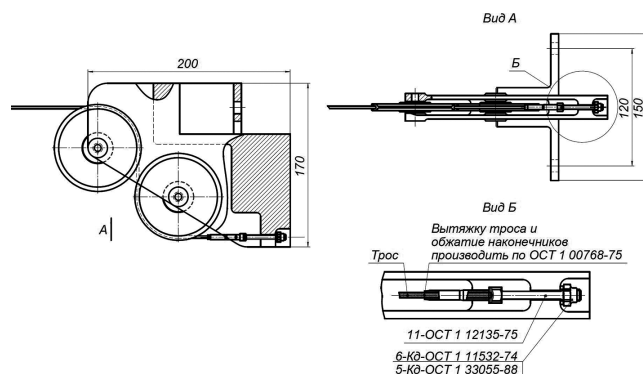


Рис. 4. Детализация конструкции устройства для имитации изгиба троса

Основным преимуществом разработанных устройств является отсутствие необходимости проектирования отдельной машины (прокатного стенда) по ГОСТ 2387-80, его изготовления и аттестации, что привело к значительному снижению финансовых затрат. Все эти этапы заменяются на проектирование и изготовление простого устройства в виде кронштейна с роликами, с возможностью его установки на существующие универсальные разрывные машины, необходимые для статического разрыва образца троса.

Таким образом, две машины (прокатная машина, по ГОСТ 2387-80 для циклических испытаний и разрывная машина для статических испытаний) заменяются на одну – разрывную и устройство в виде кронштейна с роликами.

По расчетам трудоемкость выполненных работ соответствует планируемой и в восемь раз меньше прогнозируемой по прокатному стенду, а срок выполнения удовлетворяет требуемому и на десять месяцев меньше прогнозируемого, что исключает необходимость постановки находящихся в эксплуатации изделий АТ на ремонт и проведения трудоемкой операции по замене тросовой проводки.

Проведение испытаний на выносливость авиационных тросов

Испытания образцов на циклическое растяжение проводят с усилиями, которые соответствуют воспринимаемым нагрузкам на самолете. Т. е. минимальная нагрузка за цикл соответствует предварительному изначальному натяжению троса, а максимальная нагрузка соответствует сумме предварительного натяжения и усилия, задаваемого летчиком при физическом воздействии на рычаг управления двигателями. Испытания на циклическое растяжение образца проводятся с частотой нагружения от 0,5 до 5 Гц.

Испытания могут быть проведены до обрыва первой нити троса. В этом случае обработка результатов испытаний на выносливость сводится к определению соответствия совокупности полученных результатов испытаний нормальному закону распределения, применяя известные методы математической статистики с помощью критерия согласия Пирсона.

В каждой серии опытов необходимо определять статистические характеристики: среднее арифметическое чисел циклов до полного разрушения $\bar{N}$ и среднее квадратическое отклонение S по следующим формулам:

$$\bar{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n N_i; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (N_i - \bar{N})^2}, \quad (2)$$

где n — количество образцов в каждой серии опытов.

Одновременно требуется определить среднее число циклов до начала обрыва проволок — $\bar{N}'$ и соотношение $\bar{N}'/\bar{N}$, характеризующее среднюю выносливость троса до появления первых обрывов проволок. Если характер распределения результатов незначительно отличается от нормального, то вероятность того, что максимальное отклонение $(N_i - \bar{N})$ результатов испытаний на данной установке лежит в пределах $\pm S$, будет более 0,99 (при одинаковой тщательности проведения испытаний). Коэффициент разброса с заданной надежностью ($\alpha = 0,99$) в этом случае равен $K = (\bar{N} + 3S)/(\bar{N} - 3S)$. Следует отметить, что $K > N_{\max}/N_{\min}$.

После определения величины K задается коэффициент надежности η , который зависит от ряда факторов, в том числе и от достоверности данных о повторяемости нагрузок в эксплуатации и коэффициента разброса K . Находя по результатам испытаний снижение выносливости $(N_{\text{нов}} - N_{\text{стар}})$, в циклах вследствие определенной наработки H в летных часах, определяют расчетный эквивалент Θ :

$$\Theta = \frac{H}{N_{\text{нов}} - N_{\text{стар}}} \quad (\text{л. час/цикл}), \quad (3)$$

где $N_{\text{нов}}$ — среднее значение результатов испытаний нового троса;

$N_{\text{стар}}$ — среднее значение результатов испытаний работавшего в эксплуатации троса.

На основании найденного эквивалента и коэффициента надежности, долговечность D определяется по следующей формуле:

$$D = \frac{N_{\text{стар}} \cdot \Theta}{1,5 \cdot \eta} \quad (\text{л. час}). \quad (4)$$

Коэффициент 1,5 введен для учета возможного снижения величины эквивалента Θ при предстоящей работе троса свыше H л. часов.

Поскольку существующие критерии отбраковки допускают в эксплуатацию троса только до появления первых обрывов проволок, то по найденным опытным путем отношениям $\bar{N}'/N_{\text{нов}}$ определяют долговечность тросов до предельного их состояния D' т. е. до начала разрушения отдельных нитей:

$$D' = D \cdot \frac{\bar{N}'}{N_{\text{стар}}}, \quad (5)$$

Таким образом, полный срок службы P , определяемый по результатам испытаний тросов с наработкой, составит:

$$P = H + D' \quad (\text{л. часов}), \quad (6)$$

Полученный результат допускает дополнительную корректировку, увязывающую его с межремонтным сроком службы или с повышенным техническим обслуживанием при условии, если корректировка производится в сторону увеличения коэффициента запаса надежности.

Однако для снижения времени работы испытательного оборудования испытания проводились не до обрыва троса, а до достижения заданного количества циклов нагружения $N_{\text{исп}}$, которые, например, соответствуют количеству циклов приемистости рычагов управления двигателями за назначенный ресурс самолета:

$$N_{\text{исп}} = (T \cdot \eta - N_{\text{эксп}}) \cdot K_{\text{изм}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{эксп}}$ — отработанный в эксплуатации ресурс троса, часов; T — назначенный ресурс основного изделия до списания, часов; $K_{\text{изм}}$ — количество циклов изменения режима работы троса на основном изделии за один час, изменений/час; η — коэффициент надежности.

Анализ разрушающих усилий при испытаниях на статическое растяжение образцов тросов с наработкой $N_{\text{эксп}}$ летных часов и образцов тросов после испытаний на циклическое растяжение показал, что полученные значения находятся в пределах доверительного интервала (рис. 5).

Проведена проверка и сравнение критериев рассеяния характеристик статической прочности образцов тросов, испытанных при наработке $N_{\text{эксп}}$ летных часов и после испытаний на циклическое растяжение, в том числе вычисление средних значений по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (9)$$

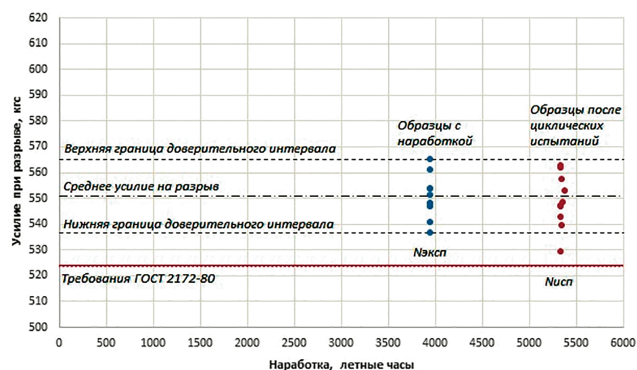


Рис. 5. Анализ разрушающих усилий образцов тросов

Проведена проверка равенства стандартных отклонений (критерий Фишера):

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} < F_{\alpha=0,05}. \quad (10)$$

Поскольку вычисленное соотношение $F < F_{\alpha=0,05}$ (α — уровень значимости), то гипотеза о равенстве стандартных отклонений принимается.

Проведена проверка равенства средних значений (критерий Стьюдента):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \cdot \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}}. \quad (11)$$

Поскольку $t < t_{\alpha=0,05}$ (α — уровень значимости), то гипотеза о равенстве средних значений принимается.

По результатам проверки установлено, что образцы тросов при наработке $N_{\text{эксп}}$ летных часа и после испытаний на циклическое растяжение имеют одинаковую статическую прочность [22]. Следовательно, в результате испытаний на циклическое растяжение образцы тросов не имеют повреждений.

Статистический анализ наработок, достигнутых при испытаниях на циклическое растяжение, показал, что ресурс тросов управления двигателями по расчету на программном обеспечении им. В.Я. Сеника составляет P летных часов с коэффициентом надежности, равным трем при нормативном значении стандартного отклонения $s = 0,15$.

По итогам работы разрывной машины, испытания на выносливость одного образца троса заняли семь часов, при этом разрушений не произошло. Дальнейший статистический анализ позволил спрогнозировать разрушение при P циклах, что эквивалентно 11,6 часам работы разрывной машины. Т. е. для испытаний одного образца затрачено на 4,6 часа меньше — снижение на 40%. Всего было испытано 15 образцов — экономия составила 69 часов работы разрывной машины.

Выводы

1. Проведен анализ нормативной документации на авиационные тросы, на методы их испытаний, выявлены недостатки прокатных по ГОСТ 2387-80 машины для испытаний тросов на циклическое растяжение (выносливость).

2. Проведены лабораторные дефектовочные исследования тросов с наработкой, построены диаграммы изменения диаметра троса по его длине.

3. Разработаны варианты переносного устройства по технической сущности, аналогичные прокатным машинам по ГОСТ 2387-80, позволяющие

проводить испытания на выносливость авиационных тросов на универсальной разрывной машине в секторе механических исследований на Московской площадке АО «Туполев».

4. Построены диаграммы рассеяния остаточной прочности, позволяющие спрогнозировать ресурс тросов до списания без необходимости визуального контроля и разрушения образцов и уменьшить время работы испытательного оборудования.

Список источников

1. Кирпичев И.Г., Шапкин В.С. Вопросы государственного контроля и регулирования процессов сервисного сопровождения эксплуатации авиационной техники в задачах поддержания летной годности. М.: НЦ ПЛГВС, 2005. 448 с.
2. Нормы летной годности самолетов транспортной категории НЛГ 25 (Часть 25). М.: Федеральное Агентство воздушного транспорта, 2022. 355 с.
3. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 30.01.2024).
4. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей: Учебник. М.: Эколит, 2016. 208 с.
5. Кирпичев И.Г., Кулешов А.А., Шапкин В.С. Основы стратегии формирования конкурентных преимуществ российской авиационной техники на современном этапе. 2-е изд., доработ. и испр. М.: Воздушный транспорт, 2007. 336 с.
6. Глазкова И.С., Беляева Ж.С. Влияние санкций на гражданскую авиацию России // Весенние дни науки: сборник докладов Международной конференции студентов и молодых ученых (21-23 апреля 2022; Екатеринбург). Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2022. С. 204–207.
7. ОСТ 1 02776-2001 Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию. Основные положения.
8. Долгов О.С., Сафоклов Б.Б. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 19–26. DOI: 10.34759/vst-2022-1-19-26
9. Митрякин В.И., Саченков О.А., Зайцева Т.А. и др. Методика оценки технического состояния втулки несущего винта с применением рентгеновской компьютерной томографии // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 117–127.
10. ГОСТ 2172-80 Канаты стальные авиационные. Технические условия. М.: ИПК. Издательство стандартов, 2003.
11. ГОСТ 2387-80 Канаты стальные. Метод испытания на выносливость. М.: Издательство стандартов, 1980.
12. Барзилович Е.Ю., Савенков М.В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. М.: Транспорт, 1987. 240 с.
13. ГОСТ 18321-73 Статический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. М.: Стандартиформ, 2008.

14. MIL-DTL-83420M Detail specification. Wire rope, flexible, for aircraft control, general specification for, 2005. 26 p.
15. ISO 2020-1973(E) International standard. Flexible steel wire rope for aircraft controls - Technical specification, 1973. 5 p.
16. Головин В.П., Шолом В.Ю., Нохрин Д.С. и др. Устройство для ресурсных испытаний стальных канатов при воздействии осевой динамической нагрузки Патент RU 2738909 C1. Бюл. № 35, 18.12.2020.
17. Шолом В.Ю., Никольская В.В., Абрамов К.А. и др. Способ и устройство для испытаний канатов на выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах. Патент RU 2640319 C1. Бюл. № 34, 07.12.2017.
18. Тарасов В.В., Постников В.А., Новиков В.Н. и др. Устройство для испытания канатов на выносливость. Патент RU 2416083 C1. Бюл. № 10, 10.04.2011.
19. Шолом В.Ю., Хасанов И.Ф., Никольская В.В. и др. Стенд для испытания стальных канатов на выносливость. Патент RU 2444718 C1. Бюл. № 7, 10.03.2012.
20. Агеев А.Г., Козлов В.В., Гарюнов Д.С. Обзор методов испытаний стальных авиационных тросов на выносливость // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): сборник трудов Международной молодежной научной конференции (09–10 ноября 2023; Казань). Казань: ИП Сагеев А.Р., 2023. С. 8–11.
21. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В. Моделирование испытаний на сжатие слоистых композитов с дефектами в виде расслоения // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 93–104.
22. Евдокимов Д.В., Алексенцев А.А., Ахтамьянов Р.М. Разработка комплексной методики оценки отклонений формы изделия и его ресурса в зависимости от технологических остаточных напряжений // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 164–173. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180659>

References

1. Kirpichev IG, Shapkin VS. *Issues of state control and regulation of the processes of maintenance support for the operation of aviation equipment in the tasks of maintaining airworthiness*. Moscow: NTs PLGVS; 2005. 448 p. (In Russ.).
2. *Standards of airworthiness of NLG 25 transport category aircraft*. Moscow: Federal'noe Agentstvo vozdušnogo transporta; 2022. 355 p. (In Russ.).
3. *Air Code of the Russian Federation dated 03.19.1997 No. 60-FZ as amended on 01.30.2024*. (In Russ.).
4. Akimov VM. *Fundamentals of reliability of gas turbine engines*. Moscow: Ekolit; 2016. 208 p. (In Russ.).
5. Kirpichev IG, Kuleshov AA, Shapkin VS. *Fundamentals of the strategy for the formation of competitive advantages of Russian aviation technology at the present stage*. 2nd ed. Moscow: Vozdushnyi transport; 2007. 336 p. (In Russ.).
6. Glazkova IS, Belyaeva ZhS. Impact of sanctions on russian civil aviation. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh "Vesennie dni nauki" (April 21-23, 2022; Ekaterinburg)*. Ekaterinburg: UrFU; 2022. p. 204–207. (In Russ.).
7. *Maintenance of technical aviation equipment according to the condition. The main provisions*. OST1 02776-2001 (In Russ.).
8. Dolgov OS, Safoklov BB. Developing maintenance and refurbishment model of aerial vehicles with artificial neural network applicaion. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(1):19–26. DOI: 10.34759/vst-2022-1-19-26 (In Russ.).
9. Mitryaikin VI, Sachenkov OA, Zaitseva TA, et al. Technical Condition Assessment Technique of the Main Rotor Sleeve by the X-Ray Computer Tomography. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):117–127. (In Russ.).
10. *Stell aircraft ropes. Technical requirements. State Standard 2172-80*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 2003. (In Russ.).
11. *Steel Ropes. Method of Endurance testiry. State Standard 2387-80*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1980. (In Russ.).
12. Barzilovich EYu, Savenkov MV. *Statistical methods for assessing the state of aviation equipment*. Moscow: Transport; 1987. 240 p. (In Russ.).
13. *Statistical quality control. Item random sampling methods. State Standard 18321-73*. Moscow: Standartinform; 2008. (In Russ.).
14. MIL-DTL-83420M Detail specification. Wire rope, flexible, for aircraft control, general specification for; 2005. 26 p.
15. ISO 2020-1973(E) International standard. Flexible steel wire rope for aircraft controls - Technical specification; 1973. 5 p.
16. Golovin VP, Sholom VYu, Nokhrin DS. et al. *Device for resource testing of steel ropes under action of axial dynamic load*. Patent RU 2738909 C1, 18.12.2020. (In Russ.).
17. Sholom VYu, Nikol'skaya VV, Abramov KA, et al. *Method and device for testing ropes for durability in liquid aggressive media and at different temperatures*. Patent RU 2640319 C1, 07.12.2017. (In Russ.).
18. Tarasov VV, Postnikov VA, Novikov VN, et al. *Device for tests of cord for durability*. Patent RU 2416083 C1, 10.04.2011. (In Russ.).
19. Sholom VYu, Khasanov IF, Nikol'skaya VV, et al. *Bench to test steel cables for fatigue*. Patent RU 2444718 C1, 10.03.2012. (In Russ.).
20. Ageev AG, Kozlov VV, Garyunov DS. Review of endurance testing methods for steel aircraft cables. *Materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "XXVI Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh)" (November 09-10, 2023; Kazan)*. Kazan: IP Sagiev AR.; 2023. p. 8–11. (In Russ.).

21. Belousov IS, Zheleznov LP, Burnysheva TV. Compression Test Simulation of Layered Composites with Delamination. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):93-104. (In Russ.).
22. Evdokimov DV, Aleksentsev AA, Akhtam'yanov RM. Developing Complex Evaluation Technique for the Product Shape Deviations and Its Endurance in Dependence of Technological Residual Stresses. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(2):164-173. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180659>

Статья поступила в редакцию / Received 04.12.2024
Одобрена после рецензирования / Revised 16.04.2025
Принята к публикации / Accepted 17.04.2025