

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЫКУЮЩИХ ПОДСБОРОК ШАРНИРНЫХ УЗЛОВ ПРИ КОСОСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

Предложена и реализована модель оценки влияния основных конструктивно-технологических параметров шарнирных узлов самолетных агрегатов на усталостную долговечность с учетом коэффициента избыточности изгибных напряжений α_{σ}^M в стыкующих подборок. При испытаниях натурных узлов в условиях кососимметричного нагружения (K^M) выявлены две зоны усталостных разрушений по длине стыкующих подборок, расположенные вблизи плоскостей разреза стыкуемых деталей, что полностью подтвердило результаты расчетной модели по определению коэффициентов α_{σ}^M . Экспериментальным путем также установлено влияние высокопрочных сталей 30ХГСН2А, ВНС-5, ВКС-170 и титанового сплава ВТ-22 на прочность узлов в области ограниченной долговечности. Показано, что применение предварительно напряженных стыкующих подборок при кососимметричном нагружении приводит к существенному росту их усталостной долговечности.

Ключевые слова: шарнирные узлы самолетных агрегатов, кососимметричное нагружение, стыкующие подборы, усталостная долговечность.

Введение

Шарнирные узлы самолетных агрегатов достаточно широко распространены в авиационных конструкциях. С их помощью стыкуются между собой агрегаты хвостового оперения, двигатели с крылом, стойки шасси с агрегатами планера и т. п. В таких условиях их роль в обеспечении долговечности особенно важна, т.к. от их совершенства зависит ресурс самолета в целом.

Исследованию долговечности таких узлов посвящен ряд работ [1,2,3], оценивающих наиболее острые проблемные вопросы. Однако задача обеспечения их усталостной долговечности продолжает оставаться актуальной, в особенности для узлов, воспринимающих и передающих кососимметричную (M) нагрузку [4] (рис. 1).

При этом величину максимальных изгибных напряжений принято оценивать в виде коэффициента избыточности изгибных напряжений [5]

$$\alpha_{\sigma}^M = \frac{\sigma_i / \sigma_b}{K^M}, \quad (1)$$

где $K^M = \frac{M}{M_p}$ – уровень действующего на узел момента M к величине разрушающего (расчетного) момента для рассматриваемого узла;

σ_b – предел прочности материала стыкующей детали.

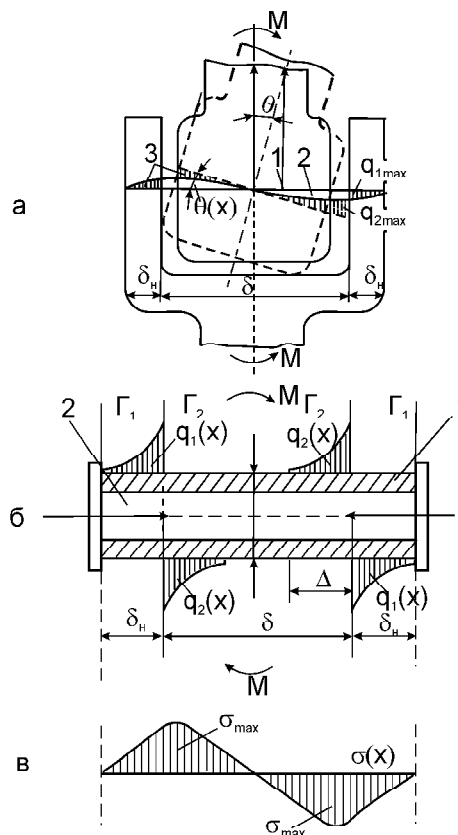


Рис. 1. Распределение изгибных напряжений в стыкующей подбороке узла, передающего моментную (M) нагрузку: 1 – основная несущая деталь стыкующей подборок; 2 – стяжка, обеспечивающая работоспособность узла при разрушении детали (1)

Выражение (1) позволило установить связь и проанализировать влияние конструктивно-технологических параметров узлов на расположение и величину α_{σ}^M коэффициента избыточности изгибных напряжений в стыкующей подборке при кососимметричном нагружении [4]:

$$\alpha_{\sigma}^M = f(\delta_n / \delta, \delta / d, \bar{\Delta}, G_1, G_2), \quad (2)$$

где $\frac{\delta_n}{\delta}, \frac{\delta}{d}, \bar{\Delta} = \frac{2\Delta}{\delta}$ – геометрический параметр узла;

G_1, G_2 – модули на смятие.

Однако, в какой мере эти напряжения влияют на усталостную долговечность, вопрос остается открытым.

В связи с этим целью данной работы является установление связи изгибных напряжений, возникающих в кососимметрично нагруженных подборках, с их усталостной долговечностью

$$N = f(\alpha_{\sigma}^M, K^M, \delta / d, \bar{\Delta}, G_1), \quad (3)$$

а также экспериментальная проверка влияния конструктивно-технологических факторов на долговечность стыкующих подборок узлов рассматриваемого типа.

Расчетная оценка усталостной долговечности стыкующих подборок шарнирных узлов

Допускаем, что усталостная долговечность при известных изгибных напряжениях σ_i стыкующей подборки в двойных логарифмических координатах оценивается выражением [6]

$$N\sigma_i = N_0\sigma_{-1q} = \text{Const}, \quad (4)$$

где N_0 – базовое число циклов до усталостного разрушения;

$\sigma_{-1q} = \sigma_{-1} / K_{\sigma}$ – предел ограниченной выносливости элемента с концентратором напряжений;

σ_{-1} – предел ограниченной выносливости гладкого образца.

При пересчете произвольного цикла переменных напряжений от внешних воздействий в симметричный цикл эквивалентной повреждаемости воспользуемся зависимостью из работы [6]:

$$\sigma_i = \Psi_q \sigma_m + \sigma_{\alpha}, \quad (5)$$

где Ψ_q – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений гладкого элемента;

$\sigma_m, \sigma_{\alpha}$ – средние и амплитудные напряжения.

В случае, если в стыкующей подборке созданы предварительные напряжения сжатия $\bar{\sigma}_c$, выражение (5) преобразуется к виду

$$\sigma_i = \Psi_q (\sigma_m - \bar{\sigma}_c \sigma_b) + \sigma_{\alpha}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_{\alpha} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\sigma_T}$, здесь σ_T – предел текучести.

Преобразуем эту зависимость с учетом особенностей нагружения (K^M, r_{σ}), а также использованием выражения (1):

$$\sigma_i = \frac{\alpha_{\sigma}^M K^M \sigma_b}{2} [\Psi_q (1 + r_{\sigma}) + (1 - r_{\sigma})] - \Psi_q \bar{\sigma}_c \sigma_b, \quad (7)$$

где r_{σ} – коэффициент асимметрии цикла.

Суммируя выражения, получим

$$(K^M \alpha_{\sigma}^M) = \frac{\frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K_{\alpha}} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{\frac{1}{m_q}} + \frac{\Psi_q}{K_{\sigma}} \bar{\sigma}_c}{0,5 \left[\frac{\Psi_q}{K_{\sigma}} (1 + r_{\sigma}) + (1 - r_{\sigma}) \right]}. \quad (8)$$

Выражение (8) служит для оценки узла и условий параметров узла и условий нагружения на усталостную долговечность (N) его стыкующей подборки.

Испытания стыкующих подборок шарнирных узлов на усталость

Лабораторные испытания стыкующих деталей при кососимметричном нагружении производились в специальном приспособлении на испытательных машинах ЦДМ–10ПУ и ЦД–100 соответственно при частоте переменного нагружения 16,7...6,7 Гц.

Коэффициент асимметрии цикла нагружения составлял 0,1. За результат испытаний принималось число циклов нагружения, при котором обнаруживалась усталостная трещина длиной 0,5...3 мм.

При испытаниях определялись характеристики кривой усталости:

– угол наклона левой части кривой ограниченной усталости и предел ограниченной выносливости на базе $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов;

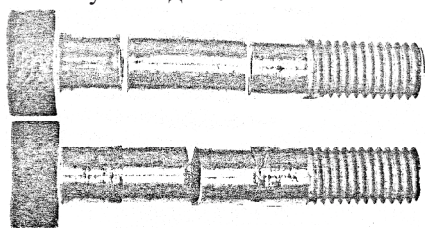
– оценка предела ограниченной выносливости по величине K^M .

Для проведения тестово-методических испытаний выбраны стыкующие детали, выполненные из хромонилевого стали 30 ХГСА диаметром 10 мм. Часть из них испытывалась при симметричном нагружении ($K_p = 1,0$ и $K_p = 0,3$), другая же партия – при кососимметричном нагружении ($K^M = 0,3$). Результаты этих испытаний приведены на рис. 2, а, б, в.

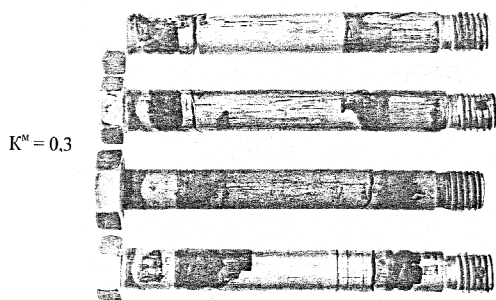
Как следует из приведенных данных, статическое разрушение стыкующей детали ($K_p = 1,0$) (рис.2, а) происходит по плоскостям среза в зоне сопряжения стыкуемых деталей.

При эксплуатационном же уровне симметричной нагрузки на узел ($K_p = 0,3$) разрушение стыкующей детали происходит в плоскости симметрии узла по причине усталости.

Принципиальное отличие разрушений стыкующей детали в узле с кососимметричным нагружением (см.рис.2, в) заключается в том, что в ней имеют место две зоны усталостных разрушений, расположенных вблизи плоскостей разъема стыкуемых деталей.



а) $K_p = 1,0$ – статический срез по двум плоскостям;
б) $K_p = 0,3$ – усталостное разрушение в плоскости симметрии



$K^* = 0,3$

в

Рис. 2. Типичные виды разрушений стыкующих деталей узлов:

а, б – при симметричном нагружении (Р);
в – при кососимметричном нагружении (М)

На рис. 2 в отчетливо видны следы фреттинг-коррозии, которая реализуется в основных областях контакта стыкуемых и стыкующей деталей, что еще раз подчеркивает принципиальное отличие как усталостных, так и износных разрушений в узлах с кососимметричным нагружением и требует проведения обстоятельных усталостных испытаний стыкующих деталей (или подборок) узлов рассматриваемого типа.

Анализируя результаты тестирования, можно прийти к заключению, что их проведение качественно подтвердило результаты моделирования напряженного деформированного состояния, а также зон усталости, описанных в работе [4], т.е. усталостные разрушения стыкующих деталей при кососимметричном нагружении узла происходят в областях максимальных изгибных напряжений (см. рис. 1, в) вблизи плоскостей разъема стыкуемых деталей.

Такой вывод дает возможность обоснованно перейти к исследованию влияния конструктивно-технологических параметров узлов на усталостную долговечность стыкуемых деталей и стыкующих подборок.

Весьма важным параметром предельно нагруженных узлов являются конструкционные материалы, используемые в стыкующих подборках, поскольку от их выбора зависит и статическая прочность, и масса, и их усталостная долговечность.

Поэтому для изготовления испытуемых образцов выбраны высокопрочные хромансильевые стали (30ХГСА и 30ХГСН2А), мартенситно-старееющие стали (ВКС–170) и коррозионно-стойкие стали (ВНС–5), а также титановый сплав ВТ–22 (табл.1).

Стали 30ХГСА, 30ХГСН2А, ВНС–5 и особенности их применения хорошо известны авиационным конструкторам.

Таблица 1

Некоторые механические характеристики хромансильевых, мартенситно-старееющих и коррозионно-стойких сталей, а также титанового сплава, используемых в стыкующих подборках самолетных узлов

Механические параметры	Конструкционные материалы				Титановый сплав ВТ-22
	Хромансильевые стали		Мартенситно-старееющие стали	Коррозионно-стойкие стали	
	30ХГСА	30ХГСН2А	ВНС-5	ВКС-170	
Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	114	162	143	166	112
Модуль упругости первого рода E , кгс/мм ²	20500	9000	19500	19000	11100
Предел выносливости σ_{-1} , кгс/мм ²		46	55	56	41

Сталь ВКС–170 создана взамен стали 30ХГСН2А для силовых деталей, в т. ч. для предельно нагруженных узлов, способных работать при $-196 < t \text{ } ^\circ\text{C} < 400$, а также для изделий, работающих в морских условиях, где

необходимо высокое сопротивление коррозионному растрескиванию.

При хромировании сталь ВКС–170 практически не наводороживается, что свидетельствует о высоких прочностных и пластических свойствах после хромирования.

Сталь ВКС-170 обладает высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию. В камере с 3% NaCl при хромировании и кадмировании получено $K_{ISCC} = 210...220 \text{ кгс/мм}^{3/2}$, тогда как у 30ХГСН2А – $35...40 \text{ кгс/мм}^{3/2}$. Коррозийное растрескивание при $\sigma = 145 \text{ кгс/мм}^2$ составляет более 90 суток (без разрушения).

Если при этом учесть, что сталь ВКС-170 не чувствительна к концентрации напряжений, не склонна к замедленному разрушению, обладает высоким сопротивлением коррозионному разрушению, не наводораживается при хромировании, то есть все основания считать, что ее использование наряду с применением титанового сплава ВТ-22 позволит обеспечить ресурс узлов, равный 50000 взлетов–посадок в течение 25 лет технической эксплуатации по состоянию.

Результаты усталостных испытаний таких стыкующих деталей приведены на рис. 3.

В абсолютных величинах усталостные кривые для сталей ВНС-5 и сплава ВТ-22 близки, и поэтому можно сделать вывод, что для рассматриваемых узлов использование титанового сплава ВТ-22 позволяет снизить массу стыкующей детали примерно на 40%.

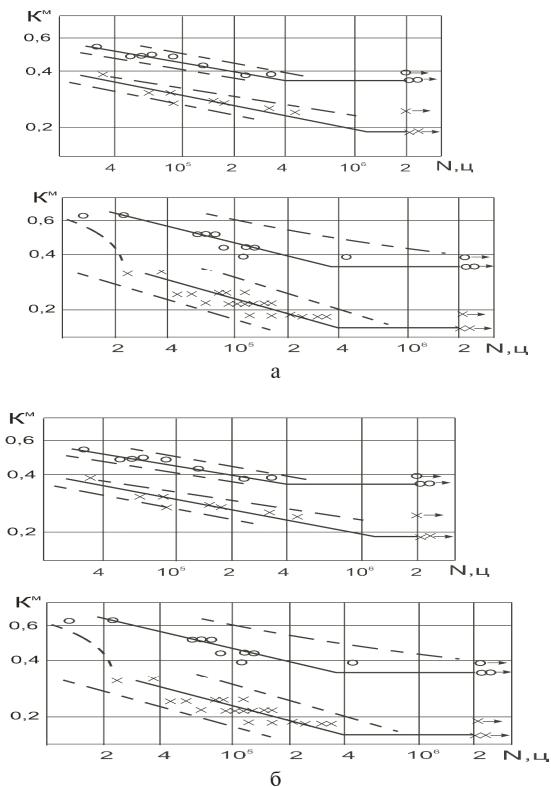


Рис. 3. Усталостная долговечность стыкующих элементов узлов: а – сталь ВНС-5; б – сплав ВТ-2; о – гладкие стыкующие элементы; × – с концентратором; о→, ×→ – без разрушений; — · — — 90%-ный доверительный интервал

Такой эффект может быть достигнут, если рассматривать одинаково прочные по статической нагрузке узлы, стыкующие подборки, которые изготовлены из сталей ВНС-5 и сплава ВТ-22.

Однако следует иметь в виду, что в данном случае M_p титанового образца на 30 % меньше стального, что дает основание говорить о том, что применение титановых стыкующих деталей при обеспечении заданной долговечности с точки зрения затрат массы не дает большого эффекта.

Вторым важным фактором, влияющим на усталостную долговечность узла, является использование вместо стыкующих деталей так называемых стыкующих подборок (см. рис. 1, б).

Отличие стыкующей подборки от стыкующей детали состоит в наличии в ней, так называемой стяжки. Эта деталь предназначена для поддержания в рабочем состоянии несущей (наружной) детали в случае ее разрушения.

Однако стяжка может выполнять и другую функцию, если в ней с помощью затяжки создать предварительное усилие T , что приведет к появлению в основной несущей детали подборки предварительных статических напряжений сжатия σ_c , величина которых в эксперименте варьировалась в пределах $\bar{\sigma}_c = 0...0,42$.

Результаты испытаний представлены на рис. 4. Очевидно, что эффективность использования предварительного сжатия растет со снижением уровня эксплуатационной нагрузки K^M и с увеличением $\bar{\sigma}_c$.

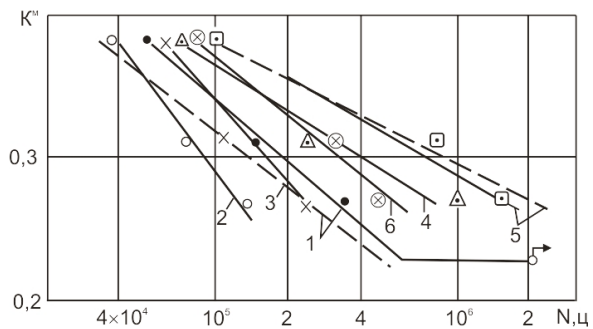


Рис. 4. Влияние предварительных напряжений $\bar{\sigma}_c$ на усталостную долговечность стыкующих подборок:

• 1 – стыкующий элемент, $m = 0$.

Стыкующая подборка: 0, 2 – $\bar{\sigma}_c = 0$;

×, 3 – $\bar{\sigma}_c = 0,125$; Δ, 4 – $\bar{\sigma}_c = 0,25$; □, 5 – $\bar{\sigma}_c = 0,33$;

⊗, 6 – $\bar{\sigma}_c = 0,43$. — — — расчетная выносливость

Следует также отметить, что при фиксированных значениях K^M изменение $\bar{\sigma}_c$ в рационально возможных пределах ведет к увеличению усталостной долговечности стыкующих

подборок в 2...7 раз, а применение стыкующих подборок с $\bar{\sigma}_c = 0,33$ при заданной долговечности N позволяет поднять допустимые значения коэффициента избыточности нормальных напряжений α_σ^M на (12...16) процентов. Поскольку стяжка расположена внутри основной стыкующей детали узла (см. рис. 1, б), то важно оценить влияние соотношений внутреннего диаметра несущей детали и наружного диаметра стяжки на усталостную долговечность стыкующей подборки в целом.

Результаты таких испытаний приведены на рис. 5.

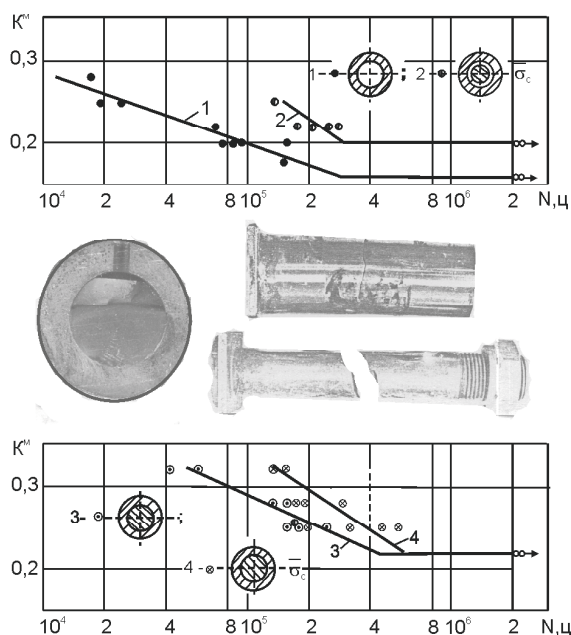


Рис. 5. Влияние конструктивного исполнения стыкующих подборок из стали ВКС-170 и их предварительного сжатия $\bar{\sigma}_c$ на усталостную долговечность: $\circ \rightarrow$ – без разрушений, $\bar{\sigma}_c = 0,29$

Выводы

На базе ранее выполненных исследований по оценке влияния параметров шарнирных самолетных узлов на величины изгибных напряжений в стыкующих подборках [4] в работе предложена и реализована модель по установлению связи основных параметров рассматриваемых узлов ($\delta_n / \delta, \delta / d, \bar{\Delta}, G_1$) коэффициента избыточности изгибных напряжений α_σ^M и уровней внешней кососимметричной нагрузки K^M на усталостную долговечность (N) стыкующих подборок.

С помощью такой модели, а также экспериментальным путем установлены:

- существенное влияние на величину N таких конструкционных материалов как хромансильевые (30ХГСА, 30ХГСН2А), мартенситно-старееющих (ВКС-170) и коррозионно-стойких (ВНС-5) сталей, а также титанового сплава ВТ-22.

- положительный эффект от использования в стыкующих подборках предварительно напряженных деталей;

- возможное варьирование зазора между основной несущей деталью и стяжкой в стыкующей подборке с целью повышения её прочности в области ограниченной долговечности.

Проведенные исследования позволяют на этапе проектирования шарнирного узла выбрать необходимые его параметры, отвечающие требованию заданной выносливости.

Литература

1. Лось А. В. Анализ усталостных и износовых разрушений в предельно нагруженных узлах самолетных агрегатов [Текст] / А. В. Лось // Вопросы проектирования самолетных конструкций: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». – Вып. 3(75). –Х., 2013. – С. 86–92.
2. Бойцов Б. В. Комплексное исследование шасси самолета [Текст] / Б. В. Бойцов – М.: Машиностроение, 1985.– 232 с.
3. Рябков В. И. Опыт повышения ресурса узлов шасси самолетов в условиях их доработки /В.И.Рябков, Ю.Ф.Белоус, В.И.Барышников // Авиационная промышленность, 1986. – №1. – С.4 – 6.
4. Лось А. В. Моделирование условий взаимодействия основных элементов подвижного узла при кососимметричном его нагружении [Текст] / А. В. Лось // Вопросы проектирования самолетных конструкций: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». – Вып. 4(76). –Х., 2013. – С. 64–72.
5. Лось А. В. Основные положения метода обеспечения долговечности подвижных самолетных узлов в условиях кососимметричного нагружения [Текст] / А. В. Лось // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: – сб. науч. тр. – Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». – Вып. 62 – Х., – 2013. – С. 5 - 12.
6. Стебеньев В. Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений / В. Н. Стебеньев // Тр. ЦАГИ. – 1981. – Вып. 2117. – С. 42 - 54.

Поступила в редакцию 01.06.2014

Лось Олександр Васильович. Утомна довговічність стикувальних підборок шарнірних вузлів при кососиметричному навантаженні

Запропоновано і реалізовано модель оцінювання впливу основних конструктивно-технологічних параметрів шарнірних вузлів літакових агрегатів на втомну довговічність з урахуванням коефіцієнта надмірності згинальних напружень у стикувальних підборках. При випробуваннях натурних вузлів в умовах кососиметричного навантаження (K^M) виявлено дві зони втомних руйнувань по довжині стикувальних підборок, розташованих поблизу площин роз'єму стикувальних деталей, що повністю підтвердило результати розрахункової моделі з визначення коефіцієнтів α_σ^M . Експериментальним шляхом також з'ясовано вплив високоміцних сталей 30ХГСН2А, ВНС-5, ВКС-170 і титанового сплаву ВТ-22 на міцність вузлів в області обмеженої довговічності. Показано, що застосування попередньо напружених стикувальних підборок при кососиметричному навантаженні приводить до істотного зростання їхньої втомної довговічності.

Ключові слова: шарнірні вузли літакових агрегатів, стикувальні підборки, втомна довговічність.

Moose Alexander Vasylyovych. Fatigue life of the joint subassemblies of hinge assemblies at skew-symmetrical loading

A model for the assessment of impact of major structural and technological parameters of the aircraft structural hinge assemblies on fatigue life of joint subassemblies considering excess bending stress coefficient of the joint subassemblies is proposed and implemented. During the test of actual assemblies under skew-symmetric loading (K^M) two zones of fatigue destruction along the joint subassembly that are located near the parting plane of the adjacent parts were identified that fully confirmed the results of the computational model for determining the coefficients α_σ^M . Influence of high-strength steels 30ХГСН2А, ВНС-5, ВКС-170 and titanium alloy ВТ-22 on the strength of assemblies in the limited life range is also demonstrated by the experiment. It is shown that the use of pre-loaded joint subassemblies under skew-symmetric loading leads to a substantial increase in their fatigue life.

Keywords: aircraft hinge assembly, joint subassemblies, fatigue life.