

П.П. Ковель, Л.В. Нагорний, П.О. Жикол

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КРОНШТЕЙНА КРІПЛЕННЯ ПІДВІСНОГО ПАЛИВНОГО БАКА ВЕРТОЛЬОТА МИ-8 ЗА НАЯВНОСТІ КОРОЗІЙНОГО УРАЖЕННЯ

У статті наведено результати аналізу напружено-деформованого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за наявності корозійного ураження. Проведено моделювання напруженого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака за наявності корозійного ураження. Результати моделювання дадуть змогу більш виважено приймати рішення під час продовження призначених показників в умовах експлуатуючих організацій, про допуск до подальшої експлуатації кронштейнів кріплення підвісних паливних баків вертольотів Ми-8 з наявними або видаленими корозійними ураженнями, які перевищують розміри, передбачені експлуатаційною документацією.

Ключові слова: напружено-деформований стан, моделювання, втомна міцність, корозія дюралюмінієвих сплавів, корозійне ураження, кронштейн кріплення підвісних паливних баків.

Вступ

Постановка проблеми. На теперішній час у державній авіації України для підтримання та відновлення справності вертольотів Ми-8 існує певна система підтримання льотної придатності вертолітного парку. Під час оцінювання технічного стану вертольотів Ми-8, в умовах експлуатуючих частин, з метою продовження призначених показників часто виявляють значні корозійні ураження кріплення підвісних паливних баків (далі – кронштейнів), які перевищують значення, визначені ремонтною документацією (за глибиною і за площею) [1, с. 21...23].

Зазначені корозійні ураження виникають через конструктивні особливості кріплення підвісних паливних баків. Внаслідок попадання вологи між залізом і обшивкою центральної частини фюзеляжу волога потрапляє на прокладку між баком і кронштейном, яка виготовлена з повсті. Волога в повсті знаходиться тривалий час і викликає значні корозійні ураження. Після видалення зазначених корозійних уражень постає питання про можливість подальшої експлуатації кронштейнів за призначенням. Для цього потрібно відповісти на питання про напружений стан (залишок міцності), що виникає під час експлуатації в кронштейнах з цілком певними корозійними ураженнями, які перевищують допустимі норми.

Метою роботи було визначення впливу корозійних уражень на напружений стан конструкції кронштейна. Вона досягнута за допомогою методу

математичного моделювання роботи конструкції кронштейнів кріплення підвісного паливного бака під навантаженням за наявності корозії.

Аналіз досліджень і публікацій

Щоб конструкція в цілому відповідала вимогам міцності, жорсткості та стійкості, а, отже, була надійною в експлуатації, необхідно надати її елементам найбільш раціональну форму і, знаючи властивості матеріалів, з яких вони виготовлятимуться, визначати відповідні розміри залежно від величини і характеру діючих сил. [2, с. 18...38, с. 63...74], [3, с. 301...305].

Під *міцністю* [4, с. 5; 5, с. 3] розуміють здатність конструкції і її деталей витримувати певне навантаження, не руйнуючись.

Під *жорсткістю* розуміють здатність конструкції і її елементів протистояти зовнішнім навантаженням відносно деформації (зміна форми і розмірів). При заданих навантаженнях деформації не повинні перевищувати певної величини, що встановлюється відповідно до вимог, які пред'являються до конструкції.

Стійкістю називають здатність конструкції або її елементів зберігати певну початкову форму пружної рівноваги.

Опір матеріалів у теоретичній частині базується на математиці та спирається на закони і теореми загальної механіки і, в першу чергу, на закони статички.

У зв'язку з потребою розв'язування складних задач еластичності та структурного аналізу,

у цивільній, морській та авіаінженерії виник метод скінченних елементів (МСЕ).

На думку відомого американського фахівця у галузі проєктування конструкцій Річарда Галлагера, історія методу починається в період 1850-1875 рр. У цей час було вироблено основні концепції теорії аналізу стрижневих конструкцій. Ці концепції було покладено основою матричних методів будівельної механіки, які остаточно сформувалися лише за 80 років, і, своєю чергою, стали передумовами до створення МСЕ [6, с. 3...7].

Розвиток теорії та дисциплін, що належать до методу скінченних елементів, у той час було дуже слабким через великі труднощі розв'язання рівнянь алгебри з великим числом невідомих.

Поява обчислювальних машин у 50-х роках ХХ століття дала поштовх розвитку методу скінченних елементів. Саме в цей час низка вчених (Тернер, Аргіріс) робили спроби сформулювати у зручній для комп'ютерів матричній формі алгоритми для розрахунку будівельних конструкцій.

Розвитку МСЕ сприяв активний розвиток комп'ютерної техніки, а також можливість його використання в більшості областей науки і практики.

У розвитку методу скінченних елементів свої ролі зіграли, як варіаційні основи механіки, так і математичні методи, засновані на варіаційних принципах. Розбиття завдання за допомогою варіаційного методу Ритца було вперше застосовано Ріхардом Курантом у 1943 р. і лише у 50-ті роки ХХ століття побачили світ такі самі роботи інших вчених (Полі Герша та інших).

Сучасну концепцію методу було визначено групою американських учених Тернером, Клаффом, Мартіном і Топпом у 1956 році. Вони, розв'язуючи задачу теорії пружності на площині, застосували новий елемент трикутної форми і сформували його як матрицю жорсткості, так і вектор вузлових сил.

Назву методу скінченних елементів, під яким ми його знаємо і в даний час, ввів у дію вчений Клафф у 1960 році.

Великий внесок у розвиток методу було зроблено Джоном (Іоаннісом) Аргірісом, який застосував матричну форму до розрахунку стрижневих систем. Саме він визначив матрицю податливості та зворотну їй матрицю жорсткості. Праці Аргіріса та його колег стали відправною точкою для матричного відображення відомих на той час чисельних методів і дозволили застосовувати їх за допомогою електронно-обчислювальних машин для розрахунків конструкцій (опубліковані в 1954-1960 роках).

У наступне п'ятиріччя після цього було опубліковано безліч робіт зі знаходження скінченних елементів для двовимірних та тривимірних конструкцій, серед авторів слід зазначити таких

вчених, як Р. Мак-Лей, Р. Мелош, Дж. Бесселін, Ф. де Веубеке, М.А. Джонс, Т. Піан. У 1967 році побачила світ і перша монографія, присвячена МСЕ, авторами якої були І. Чанг та О. Зенкевич.

Математична теорія методу з'явилася лише в 70-х роках, її зародження простежується в працях таких вчених, як І. Бабушкін, Р. Галлагер, Ж. Деклу, Дж. Оден, Г. Стренг, Дж. Фікс [7, с. 11...22]. Вагомий внесок було зроблено і такими вченими, як В.Г. Корнєєв, Л.А. Рогозін і А.С. Сахаров. Так, В.Г. Корнєєв зіставив математичні сутності методу скінченних елементів і варіаційно-різностного методу і вказав на їх збіг. Над тією ж темою працював Л.А. Рогозін, а А.С. Сахаровим розроблена моментна схема скінченного елемента.

Останній час метод скінченних елементів характеризується активним розвитком та застосуванням для розрахунку динаміки конструкцій, оптимізації проєктування та обліку нелінійної поведінки.

Мета статті – обґрунтування можливості експлуатації кронштейнів кріплення підвісних паливних баків вертольотів Ми-8 з видаленими корозійними ураженнями, які перевищують допустимі величини, встановлені ремонтною документацією.

Виклад основного матеріалу

Під час виготовлення кронштейна кріплення підвісного паливного баку вертольота Ми-8 використовують конструкційний матеріал – алюмінієвий сплав –АК4-1.

Характеристики алюмінієвого сплаву АК4-1.

АК4-1 – алюмінієвий жароміцний деформований сплав (табл. 2.1...2.3) є модифікацією сплаву АК4 і, в порівнянні з ним, має більш високі характеристики міцності. Технічні умови на виготовлення сплаву регламентують задовільну пластичність у гарячому стані, задовільне зварювання та верстатний обробіток. Термічна обробка: гартування від температури $T=525...535$ °С, штучне старіння за температури $T=170$ °С протягом 16 год. Алюмінієвий сплав АК4-1 (таблиці 1...3) застосовується для виготовлення вузлів з'єднання, кронштейнів та ін.

Таблиця 1

Хімічний склад у % сплаву АК4-1 (Al – основа)

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки
0.8-1.3	до 0.35	до 0.2	0.8-1.3	0.02-0.1	92.05-96.08	1.9-2.45	1.4-1.8	до 0.3	інші, кожна 0,05; усього 0,1

Джерело: [8, с. 234...239].

Таблиця 2

Механічні властивості сплаву АК4-1 ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Сортамент	Межа міцності, σ_b , МПа	Межа текучості, σ_T , МПа	Подовження при розриві, δ_5 , %	Ударна в'язкість, КСУ, кДж / м ²	Твердість НВ 10 ⁻¹ , МПа
лист	380	310	6	200	109 - 117
профілі	400	330	8	-	-

Джерело: [8, с. 234...239].

Таблиця 3

Фізичні властивості сплаву АК4-1

Сортамент	Температура, $T^{\circ}\text{C}$	Модуль пружності, $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/Град	Теплопровідність, λ , Вт/м·град	Щільність, ρ , кг/м ³	Теплоємність, Дж/кг·град
лист	20	0.72	-	-	2800	-
профілі	100	-	20.8	146	-	797

Джерело: [8, с. 234...239].

Комп'ютерне моделювання напруженого стану кронштейна кріплення зовнішнього бака вертольота Ми-8.

Попередньо, на основі креслень побудовано 3D геометричну модель кронштейна кріплення зовнішнього бака вертольота Ми-8, яка зображена на рис.1.

Моделювання статичного навантаження кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за різних режимів навантаження виконувалося методом скінченних елементів.

Попередньо модель (рис. 1) розділено на скінченні елементи (рис. 2) та налічує в собі 24899 вузлів та 15345 елементів.

Під час побудови в моделі сітки скінченних елементів задіяно препроцесор генерації сітки SolidWorks Meshing. Форма елементів – тетраедр.

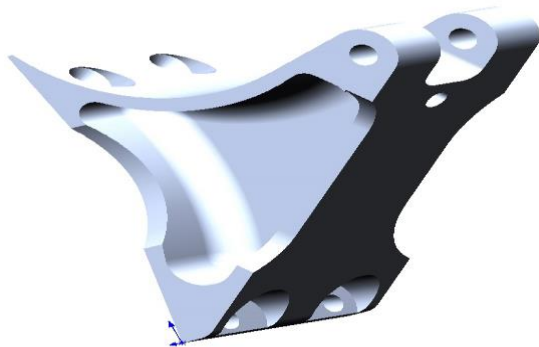


Рис.1. Комп'ютерна модель кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8.

Джерело: розроблено авторами.

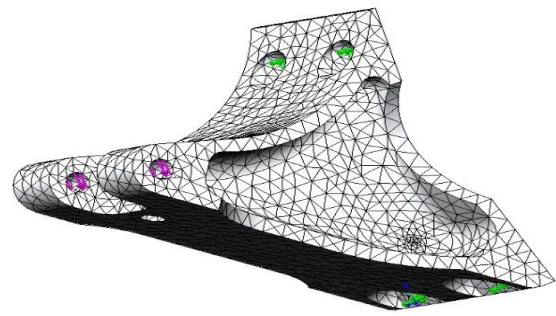


Рис. 2. Схема розбиття геометричної моделі кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 на скінченні елементи

Джерело: розроблено авторами.

Добре відомо, що похибка результатів розрахунку, їх коректність залежать від розмірів елементів та кількості вузлів. Бажання створити найдрібнішу сітку вступає в протиріччя з часом розрахунку. Тому розміри елементів у різних зонах кронштейна кріплення підвісного паливного бака були різними. Для цього використовувалася неструктурована комбінована розрахункова сітка. У місцях можливих концентраторів напружень розмір елементів зменшувався, а їх кількість збільшувалася.

На рис. 3 представлено модель кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 із відповідним розбиттям на скінченні елементи. Для пошуку параметрів оптимального розрахунку виконано майже 8 варіантів розрахунків з різними параметрами сітки.

Для створення якісної сітки використовувалося її згладжування із відповідним зміщенням вузлів поблизу переходів та навколо криволінійних поверхонь. Обрано оптимальні умови розрахунку сітки моделі (таблиця 4).

Таблиця 4

Основні властивості сітки

Тип сітки	Сітка на твердому тілі
Розбиття тіла	Сітка на основі кривизни
Точки Якобіана	4 точок
Макс. розмір елемента	6.21528 мін
Мінімальн. розмір елемента	1.24306 мм
Якість сітки	Висока
Всього вузлів	24899
Всього елементів	15345
Максимальне співвідношення сторін	52.877
Процент елементів співвідношення сторін < 3	98.2
Процент елементів с співвідношення сторін > 10	0.0261
% спотворених елементів (якобіан)	0
Час для створення сітки (hh:mm:ss)	00:00:17

Джерело: розроблено авторами.

Розрахунки напружено-деформованого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8.

Для виконання розрахунків та аналізу напружено-деформованого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 необхідно розв'язати за допомогою програмного комплексу SolidWorks такі задачі:

визначення компонент напружень кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за статичного навантаження без пошкоджень;

визначення компонент напружень кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за наявності корозійного ураження.

Граничні умови:

Кронштейн кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 не мав початкових залишкових технологічних напружень.

Для кожної задачі використовувалися індивідуальні окремі граничні умови контакту.

Аналіз результатів чисельного дослідження напруженого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8.

Напружений стан розраховано в пружній постановці. Він має суттєвий неоднорідний розподіл по об'єму кронштейна кріплення підвісного паливного баку. Основна увага приділялася компонентам головних напружень в напрямках осей X , Y , Z , а саме σ_x , σ_y , σ_z , а також їх інтенсивності σ_i .

На рисунках 3–5 зображені розподіли інтенсивності нормальних напружень по об'єму кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8. Було розглянуто два основних випадки навантаження об'єкту дослідження: перший випадок – напружено-деформований стан кронштейна без пошкоджень і другий – за наявності корозійного ураження.

Властивості матеріалу приймалися на початок його виготовлення без урахування реологічних процесів та можливої деградації за час експлуатації. Спостерігаються зони розтягу та стиснення.

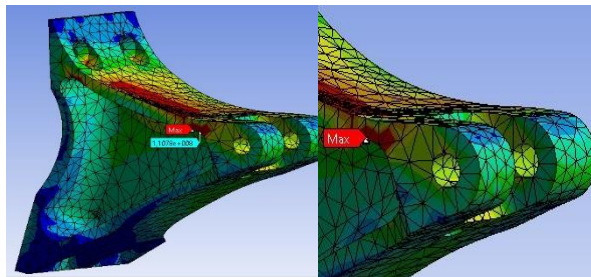


Рис. 3. Результати дослідження напружено-деформованого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 без корозійного ушкодження.

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3 проілюстровано розподіл інтенсивності нормальних напружень за об'ємом кронштейна без пошкоджень. Максимальні напруження досягають значень $\sigma_i=110$ МПа. Максимальні напруження знаходяться у місці наближеного до вузла з'єднання зі стрічкою стягування. Це місце співпадає з розташуванням тонкої вигнутої полиці кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8.

На рис. 4, 5 проілюстровано розподіли інтенсивності нормальних напружень за об'ємом кронштейна, який отримав корозійне ураження тонкої вигнутої полиці кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8. Максимальні напруження досягають значень $\sigma_i=332$ МПа. Максимальні напруження знаходяться у місці розташування корозійного пошкодження біля вузла з'єднання зі стрічкою кріплення. Це місце співпадає з розташуванням повстяної прокладки між корпусом підвісного бака і тонкої вигнутої полиці кронштейна.

При цьому кронштейн кріплення підвісного паливного бака не втрачає несучу спроможність і витримує експлуатаційне навантаження.

Це пов'язане з тим, що корозійне ураження, в основному, відбувається на поверхні та всередині вигнутої полиці кронштейна кріплення підвісного паливного баку, а саме в місці розташування прокладки з повсті (рис. 6). Ця повстяна прокладка гігроскопічна і сприяє виникненню корозійного пошкодження матеріалу кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 [9, с. 2...3; 7, с. 25..38].

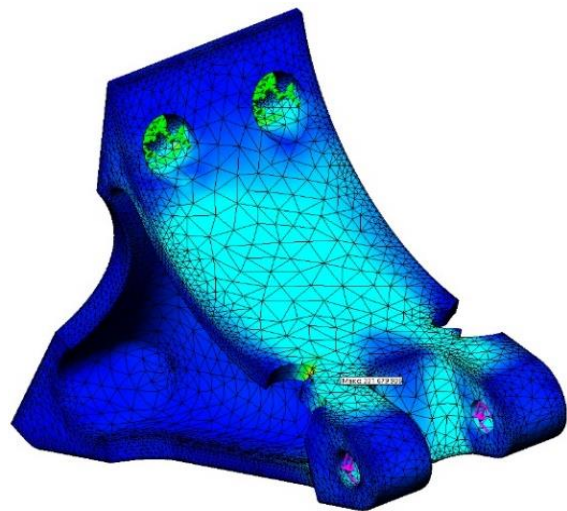


Рис. 4. Результати розрахунку напружено-деформованого стану кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за наявності корозійного ураження.

Джерело: розроблено авторами.

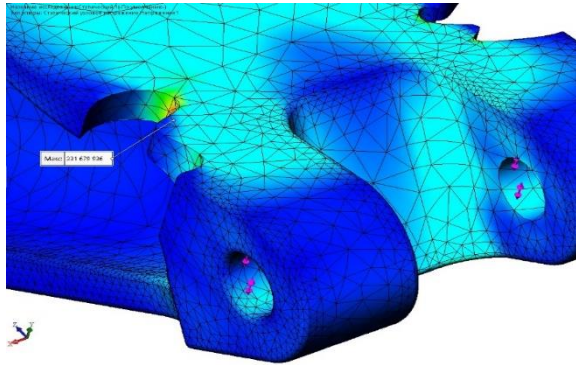


Рис. 5. Результати розрахунку напружено-деформованого стану місць кріплення стяжних стрічок кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8 за наявності корозійного ураження.

Джерело: розроблено авторами.

Під час розрахунку на міцність кронштейнів кріплення підвісних паливних баків вертольота Ми-8 визначаються умови навантаження, що мають місце в експлуатації і обумовлюють найбільш важкі умови роботи силових елементів конструкції і планера вертольота у цілому. Ці умови називають “випадками навантаження”.

Міцність кожного агрегату вертольота перевіряється за усіма випадками навантаження, які виникають в елементах конструкції найбільш статичні або динамічні навантаження. Найбільше навантаження кронштейнів кріплення баків вертольота виникає у випадку виходу з планерування.



Рис. 6. Корозійне ураження кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8.

Джерело: [10, с. 49].

Висновок

Таким чином, за результатами досліджень встановлено, що:

1. Під час експлуатації вертольотів перевищення вертикальних перевантажень виникають досить рідко. Незважаючи на досить значні корозійні ураження кронштейнів кріплення підвісних паливних баків, завдяки тому, що їх для кріплення одного баку використовується чотири штуки, руйнування зазначених кронштейнів в експлуатації не виявлено.

2. Під час дослідження напружено-деформованого стану кронштейна визначено, що зона максимальних напружень співпадає з місцем розташування вигнутої полиці кронштейна кріплення підвісного паливного бака вертольота Ми-8, як без, так і за наявності корозійного ураження.

3. Процес розвитку зони корозійного ушкодження відбувається внаслідок наявності гігроскопічної повстяної прокладки. Руйнування за механізмом корозійного ураження вірогідно сформувалось за умови впливу вологи та постійного статичного навантаження під час експлуатації.

Напрями подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати щодо розробки заходів заміни матеріалів прокладок між підвісними баками і деталями їх кріплення, обрахуванням максимальних розмірів і глибини корозійних уражень різних елементів фюзеляжу вертольота, які будуть формувати граничні умови можливої експлуатації вертольотів Ми-8 з різними корозійними ураженнями елементів фюзеляжу.

Список літератури

1. “Альбом основных сочленений и ремонтных допусков вертолета Ми-8”, 1991, - 27 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни “Опір матеріалів” (для студентів всіх механічних спеціальностей денної і заочної форм навчання) / Укл. Л.В. Кутовий, Т.П. Зінченко і В.А. Овчаренко. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Ч.1. – 196 с.
3. Гудков А.И., Лешаков П.С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968, – 470 с.
4. Надійність техніки. Терміни та визначення. ДСТУ 2860-94, - 33с.
5. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. ДСТУ 2864-94, 1994, – 8с.
6. История появления метода конечных элементов [электронный ресурс] – Режим доступа: www.it-nv.ru. – Загол. з екрана (дата звернення до ресурсу 09.07.2023).
7. Галлагер. Р. Метод конечных элементов. Основы. / перевод с англ. В.М. Картвелишвили, под ред. Н.В. Баничука – М.: Мир. 1984. – 428 с.
8. ГОСТ 9.908.-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости, 1987, – 18с.
9. ГОСТ 9.039-74. Единая система защиты от крозии и старения. Коррозионная активность атмосферы., 1974, – 50 с.
10. Про результати виконання робіт щодо продовження призначеного строку служби вертольота Ми-8МТ під час виконання капітального ремонту, звіт ДНДІА, 2022, – 145 с.

Надійшла до редколегії 12.10.2023

Схвалена до друку 08.11.2023

Відомості про авторів:

Ковель Петро Петрович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3099-4467>

Нагорний Леонід Вікторович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7489-5172>

Жикол Павло Олександрович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9891-5097>

Information about the authors:

Petro Kovel

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3099-4467>

Leonid Nagorniy

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7489-5172>

Pavel Zhikol

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9891-5097>

**ANALYSIS OF THE STRESSED AND DEFORMED CONDITION OF POWER ELEMENTS OF THE
MOUNTING OF THE MI-8 HELICOPTER REDUCER IN
THE PRESENCE OF CORROSION DAMAGE**

P. Kovel, L. Nagorniy, P. Zhikol

The article presents the results of the analysis of the stress-strain state of the mounting bracket of the outboard fuel tank of the Mi-8 helicopter in the presence of corrosion damage. Simulation of the stress state of the mounting bracket of the hanging fuel tank in the presence of corrosion damage was carried out. The results of the simulation will make it possible to make a more balanced decision, during the continuation of the specified indicators in the conditions of operating organizations, about the admission to further operation of the mounting brackets of the outboard fuel tanks of Mi-8 helicopters with existing or removed corrosion lesions that exceed the dimensions provided for in the operational documentation.

At present, the state aviation of Ukraine has a certain system for maintaining the airworthiness of the helicopter fleet for maintaining and restoring the serviceability of Mi-8 helicopters. During the assessment of the technical condition of Mi-8 helicopters, in the conditions of operating units, in order to continue the specified indicators, significant corrosion damage to the attachment of the outboard fuel tanks is often found, which exceed the values determined by the repair documentation (in terms of depth and area).

The specified corrosion damage occurs due to the design features of the mounting of the hanging fuel tanks. Due to the ingress of moisture between the iron and the lining of the central part of the fuselage, moisture falls on the gasket between the tank and the bracket, which is made of felt. Moisture stays in the felt for a long time and causes significant corrosion damage. After the removal of the mentioned corrosion lesions, the question arises about the possibility of further operation of the brackets as intended.

For this, it is necessary to answer the question about the stressed state (residual strength), which occurs during operation in brackets with quite certain corrosion lesions that exceed the permissible standards.

The purpose of the work was to determine the effect of corrosion damage on the stress state of the bracket structure. It was achieved using the method of mathematical modeling of the structure of the mounting brackets of the suspended fuel tank under load in the presence of corrosion.

Keywords: stress-strain state, modeling, fatigue strength, corrosion of duralumin alloys, corrosion damage, mounting bracket for hanging fuel tanks.