МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра міцності літальних апаратів

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

(тип кваліфікаційної роботи)

другий (магістерський)
(освітній ступінь)

на тему: ***«Дослідження згинальної стійкості та кріплінгу тонкостінних авіаційних конструкцій»***

Виконав: студент II курсу групи № 168
Галузь знань *13 «Механічна інженерія»*
(код та найменування)

Спеціальність 131 *«Прикладна механіка»*
(код та найменування)

Освітня програма *«Динаміка і міцність машин»*
(найменування)

Пелих В.П.
(прізвище та ініціали студента)

Керівник: Мірошніков В.Ю.
(ім'я прізвище)

Рецензент: Аврамов К.В.
(ім'я прізвище)

Харків – 2024

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет *Літакобудування*

Кафедра *102 «Міцність літальних апаратів»*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *13 «Механічна інженерія»*

Спеціальність *131 «Прикладна механіка»*
(код та найменування)

Освітня програма *«Динаміка і міцність машин»*
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

д.т.н., професор. Віталій МІРОШНІКОВ
“____” _____2024року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пелих Валентин Павлович
(прізвище, ім’я та по батькові)

1.Тема кваліфікаційної роботи **Дослідження згинальної стійкості та кріплінгу тонкостінних авіаційних конструкцій**

керівник кваліфікаційної роботи Мірошніков Віталій Юрійович, д.т.н., професор каф.102
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 1938- уч від «21 » жовтня 2024 року
2.Термін подання студентом кваліфікаційної роботи 10 грудня 2024 р.

Вихідні дані до роботи 1. Серія профілів типу «ПР-102» авіаційний бульбокутник.
2. Циліндричний відсік з $R = 0{,}35$ м; $N = -1000$ кН; матеріал Д16Т.
3. Оребрена панель з $M = 400$ кНм; $b = 1$ м; $a = 0{,}25$ м; $H = 0{,}5$ м; матеріал Д16.

Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв’язати)

1 Дослідження моделей згинальної форми втрати стійкості
1.1 Загальна втрата стійкості
1.2 Місцева втрата стійкості
1.3 Стійкість тонкостінних стрижнів
2 Дослідження моделей прогнозування напружень кріплінгу

2.1 Модель Нідхема
2.2 Модель Джереда
2.3 Модель Андерсона
2.4 Модель МакКомбса
2.5 Загальний розв’язок
2.6 Розробка емпіричної моделі кріплінгу для алюмінієвих сплавів
3 Розрахунок напружень кріплінгу типових авіаційних профілів
3.1 Кутникові перерізи
3.2 Двокутові секції типу швелерів та зетів
3.3 Таврові перерізи
3.4 Закриті капелюхові перерізи
3.5 Двотаврові перерізи
3.6 Бульбокутники
4 Дослідження оптимальності стиснутих елементів авіаційних конструкцій
4.1 Питання оптимальності авіаційного бульбокутника по розташуванню центру згину
4.2 Оптимальне співвідношення між матеріалом стрингерів та обшивки в стиснутому відсіку
4.3 Визначення параметрів оптимальної монолітної панелі

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Дослідження моделей згинальної форми втрати стійкості	Мірошніков В.Ю., д.т.н., професор каф.102	21.10	01.11
2. Дослідження моделей прогнозування напружень кріплінгу	Мірошніков В.Ю., д.т.н., професор каф.102	01.11	08.11
3. Розрахунок напружень кріплінгу типових авіаційних профілів	Мірошніков В.Ю., д.т.н., професор каф.102	08.11	14.11
4. Дослідження оптимальності стиснутих елементів авіаційних конструкцій	Мірошніков В.Ю., д.т.н., професор каф.102	14.11	29.11

Нормоконтроль _____ Мірошніков В.Ю. «____» _____2024 р.
(підпис) (ім’я та прізвище)

Дата видачі завдання «21» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Дослідження моделей згинальної форми втрати стійкості	01.11.2024	+
	Загальна та місцева втрата стійкості	01.11.2024	+
	Стійкість тонкостінних стрижнів	04.11.2024	+
2	Дослідження моделей прогнозування напружень кріплінгу	08.11.2024	+
	Модель Нідхема та Джереда	08.11.2024	+
	Модель Андерсона та МакКомбса	08.11.2024	+
	Загальний розв’язок та розробка емпіричного методу	11.11.2024	+
3	Розрахунок напружень кріплінгу типових авіаційних профілів	14.11.2024	+
	Розрахунок кутових та двокутових перерізів	14.11.2024	+
	Розрахунок таврових та двотаврових перерізів	14.11.2024	+
	Розрахунок капелюхових та бульбоподібних перерізів	18.11.2024	+
4	Дослідження оптимальності стиснутих елементів авіаційних конструкцій	20.11.2024	+
	Питання оптимальності авіаційного бульбокутника по розташуванню центру згину	20.11.2024	+
	Оптимальне співвідношення між матеріалом стрингерів та обшивки в стиснутому відсіку	25.11.2024	+
	Визначення параметрів оптимальної монолітної панелі	29.11.2024	+

Здобувач _____ **Пелих В.П.**
(підпис) (ім’я та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи
_____ **Мірошніков В.Ю.**
(підпис) (ім’я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до диплому магістра містить: 131 с., 64 рис., 15 табл., 4 дод., 123 дж.

МІЦНІСТЬ, СТІЙКІСТЬ, КРІПЛІНГ, ГРАНИЧНИЙ СТАН, СТИСК, ПРОФІЛЬ, ТОНКОСТІННИЙ СТРИЖЕНЬ, НАПРУЖЕННЯ, КРИТИЧНА СИЛА, РУЙНУВАННЯ, ЗАКРИТИЧНА ПОВЕДІНКА, МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

Об’єкт дослідження: модель визначення граничного напруження тонкостінного стиснутого стрижня

Мета роботи:

- дослідження загальної стійкості тонкостінних стиснутих конструкцій в пружній та пластичних зонах;

- дослідження місцевої стійкості стиснутих конструкцій в пружній та пластичних зонах;

- дослідження кріплінгу та несучої здатності конструкцій;

- аналіз закритичної поведінки.

Методи дослідження: аналітичні, напівемпіричні, метод скінченних елементів, статистичні, експериментальні.

Під час навчання на магістратурі опубліковано статті в наукових журналах:

1. Пелих В. П., Кибальний М. Ю., Дегтяренко С. О. Transport helicopter blade root cuff attachment modernization concepts. Наука і техніка повітряних сил збройних сил України. 2024. № 2(55). С. 23–31. URL: https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.03 (дата звернення: 23.11.2024).

2. Miroshnikov V. Y., Pelykh V. P., Denshchykov O. Y. Analysis of the stress state of a layer with two cylindrical swivel joints and a cylindrical cavity. Journal of

mechanical engineering. 2024. Т. 27, № 2. С. 25–35. URL: https://doi.org/10.15407/pmach2024.02.025 (дата звернення: 23.11.2024).

3. Pelykh V., Andryushchenko V. Determination of the features of integrated design of civil long-range aircraft with transonic truss-braced wing at the preliminary design stage. Technology audit and production reserves. 2024. Т. 1, № 1(75). С. 35–42. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.298600 (дата звернення: 23.11.2024).

Під час навчання на магістратурі опубліковано тези в збірниках конференцій:

1. В. П. Пелих, «Порівняльний аналіз моделей кріплінгу за Нідхемом і Флабелем», т. у XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація». – О.: ОНТУ, 2024. Дата звернення: 20 лист. 2024. Доступно: https://www.ontu.edu.ua/download/konfi/2024/Collection-of-abstracts-of-the-conference-ITIA-2024.pdf

2. В. П. Пелих, «Ітеративний підхід в проектуванні монолітної панелі з ребрами простої форми», т. у V Міжнародній науково-практичній конференції «Авіація, промисловість, суспільство». – К.: КЛК ХНУВС, 2024. Дата звернення: 20 лист. 2024. Доступно: https://dspace.univd.edu.ua/handle/123456789/21115

3. В. П. Пелих, Андрющенко В. М., «Уточнення коефіцієнту висоти центрів ваги поясів лонжеронів», т. у XXVI Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос». – Д.: НЦАОМ, 2024. Дата звернення: 15 трав. 2024. [Онлайн]. Доступно: https://spacehuman.org.ua/catalog/spacehuman_2024/163.htm

4. В. П. Пелих, «Підходи та принципи розрахунку проводки системи керування літального апарату на статичну міцність», т. у XXIV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій». – О.: ОНТУ, 2024. Дата звернення: 29 квіт. 2024. [Онлайн]. Доступно: https://ontu.edu.ua/information_systems_technologies

5. В. П. Пелих, «Критичні напруження гладкої циліндричної оболонки в межах лінійних деформацій», т. у III Міжнародній науково-практичній конференції

«Авіація і космонавтика». – К.: ВСП Криворізький фаховий коледж Національного авіаційного університету, 2024.

6. В.П. Пелих, «Використання спеціалізованого програмного забезпечення для навчального процесу за авіаційною спрямованістю», т. у VI Всеукраїнській науково-методичній конференції «Забезпечення якості вищої освіти». – О.: ОНТУ, 2024.

7. В.П. Пелих, «До питання паливної ефективності літаків з крилом надвеликого подовження в порівнянні з літаками з крилом великого подовження на етапах зльоту, польоту та посадки», т. у Всеукраїнській науковій конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування». – Ж.: Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. Доступно: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/168.pdf

8. В. П. Пелих, В. М. Андрющенко, «Порівняння довговічності обшивки крил літаків з крилом надвеликого подовження з аеродинамічним підкосом та літаків з крилом великого подовження», т. у XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація». – О.: ОНТУ, 2023. Дата звернення: 30 лист. 2023. Доступно: https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Collection-of-abstracts-of-the-conference-ITIA-2023.pdf

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 10
1 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЗГИНАЛЬНОЇ ФОРМИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ 12
1.1 Загальна втрата стійкості 12
1.1.1 Втрата стійкості в межах лінійної поведінки (модель Ейлера) 12
1.1.2 Втрата стійкості за межами лінійної поведінки 15
1.2 Місцева втрата стійкості 25
1.2.1 Втрата стійкості в межах лінійної поведінки 25
1.2.2 Втрата стійкості за межами лінійної поведінки 28
1.3 Стійкість тонкостінних стрижнів 32
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕНЬ КРІПЛІНГУ 37
2.1 Модель Нідхема 37
2.1.1 Класична модель 37
2.1.2 Модифікований підхід 41
2.2 Модель Джерарда 43
2.2.1 Класична модель 43
2.2.2 Модифікований підхід 46
2.3 Модель Андерсона 49
2.4 Модель МакКомбса 50
2.5 Загальний розв’язок 51
2.5.1 Загальний розв’язок по Ню 51
2.5.2 Загальний розв’язок по NASA 53
2.6.2 Розробка емпіричної моделі кріплінгу для алюмінієвих сплавів 54
3 РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ КРІПЛІНГУ ТИПОВИХ АВІАЦІЙНИХ ПРОФІЛІВ 58
3.1 Кутникові елементи (L-профілі) 58
3.1.1 Профіль ПР-100 58
3.1.2 Профіль ПР-101 61

3.1.3 Профіль ПР-111 63
3.2 Двохкутові секції типу швелерів та зетів (С-, Z-профілі) 65
3.2.1 Профіль ПР-105 65
3.2.2 Профіль ПР-106 68
3.3 Таврові перерізи (Т-профілі) 70
3.3.1 Профіль ПР-113 70
3.3.2 Профіль ПР-109 72
3.3.2 Профіль ПР-315 73
3.4 Закриті капелюхові перерізи (Hat-профілі) 74
3.5 Двотаврові перерізи (I-, J-, H-профілі) 74
3.6 Бульбокутники 74
3.6.1 Профіль ПР-102 74
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОСТІ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ 78
4.1 Питання оптимальності авіаційного бульбокутника по розташуванню центру згину 78
4.2 Оптимальне співвідношення між матеріалом стрингерів та обшивки в стиснутому відсіку 85
4.3 Визначення параметрів оптимальної монолітної панелі 95
ВИСНОВКИ 112
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ 114
ДОДАТОК А Визначення положення ЦЗ профілю типу ПР-102 127
ДОДАТОК Б Визначення положення ЦЗ профілю типу ПР-102М 128
ДОДАТОК В Приклад визначення параметрів стиснутого відсіку 129
ДОДАТОК Г Приклад визначення параметрів стиснутої панелі з простим оребренням 130

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

E – модуль нормальної пружності;

E_c – модуль нормальної пружності на стиск;

E_t – дотичний модуль нормальної пружності;

E_s – січний модуль пружності;

$\sigma_{\text{пц}}$ – межа пропорційності;

$\sigma_{\text{п}}$ – межа плинності;

σ_B – межа міцності;

x, y – повздовжня та поперечна вісь стрижня;

$y(x)$ – прогин стрижня;

l – довжина стрижня;

P – стискальна сила;

M – згинальний момент в перерізі;

I – момент інерції стрижня;

ЛА – літальний апарат;

ТС – тонкостінний стрижень.

ВСТУП

Втрата стійкості та кріплінг тонкостінних авіаційних профілів є одними з ключових аспектів аналізу міцності сучасних авіаційних конструкцій. Зростаючі вимоги до ефективності, економічності надійності та безпеки літальних апаратів змушують інженерів ретельно аналізувати ці явища з метою забезпечення довговічності та оптимізації вагових характеристик повітряних суден.

Більшість елементів ЛА за класифікацією підходять і до визначення бруса (елемента, що має один габаритний розмір багато більше двох інших) і до визначення оболонки (елемента, що має один габаритний розмір багато менше двох інших). Більшість аналітичних моделей та теорій розроблені або в справедливості моделі бруса (балкова теорія Ейлера-Бернуллі, теорія Тимошенко тощо) або оболонки (класична теорія Кірхгофа-Лява, пластина Рейснера-Міндліна, нелінійна теорія Фепля-Кармана). Елементи ЛА слід класифікувати як тонкостінні стрижні – елементи, один габаритний розмір якого багато більше двох інших, а інший розмір багато менше двох інших. Теоретичні викладки для такого елементу ще недостатньо розвинуті, тож часто такі елементи рахуються на основі емпіричних або псевдоаналітичних методів.

Тонкостінні елементи, такі як силові елементи крила, фюзеляжу, оперення, а також несучі елементи конструкцій шасі, піддаються складному навантаженню, що включає розтяг-стиск, згин, зсув, кручення та комбінації цих навантажень, що може призводити до загальної втрати стійкості або загального руйнування елементів.

Авіаційні компанії, такі як Boeing та Airbus, а також дослідницькі організації на кшталт NASA, постійно працюють над удосконаленням методів моделювання та прогнозування втрати стійкості тонкостінних профілів. Завдяки таким дослідженням вдається не лише підвищувати надійність конструкцій, але й значно знижувати їх масу, що критично важливо для зменшення витрат палива та покращення загальної ефективності авіаційної техніки.

Елементи, що навантажені розтягом рахуються як критичні на втому, елементи навантажені на стиск рахуються як критичні на втрату стійкості.

У цій роботі розглянуті сучасні підходи до аналізу втрати стійкості та кріплінгу, зокрема, класичні моделі Джерарда та Андерсона, які використовуються в інженерній практиці для оцінки міцності тонкостінних конструкцій. Окрім цього, буде проведено огляд експериментальних досліджень, проведених у NASA, які підтверджують точність цих моделей при застосуванні до різних типів авіаційних профілів, що використовуються в сучасних комерційних літаках, таких як Boeing 787 Dreamliner та Airbus A350.

Зокрема, важливо підкреслити роль цих досліджень у процесі створення нових поколінь конструкцій, здатних витримувати високі рівні навантаження, зберігаючи при цьому аеродинамічні та вагові характеристики.