

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**АНДРЕЄВ ОЛЕКСІЙ ВІКТОРОВИЧ**



УДК 629.735.33/621.763

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
СТВОРЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ ЛІТАКІВ  
З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЕТАПАХ  
ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБУ**

Спеціальність 05.07.02 - проектування, виробництво  
та випробування літальних апаратів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ - 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на Державному підприємстві «АНТОНОВ»  
Державного концерну «УКРОБОРОНПРОМ»

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Бичков Сергій Андрійович**,  
Державне підприємство «АНТОНОВ»,  
Віце-президент – Директор виконавчий.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Санін Анатолій Федорович**  
Дніпровський національний  
університет ім. Олеся Гончара  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри технології виробництва  
літальних апаратів

доктор технічних наук, професор  
**Кучер Микола Кирилович**  
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка  
НАН України  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач відділу механіки конструкційних  
матеріалів

доктор технічних наук, професор  
**Львов Геннадій Іванович**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри динаміки та міцності машин

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_ 20\_\_ р. о \_\_<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корп.11, к.220.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06,  
кандидат технічних наук, с.н.с.



О. Ю. Корчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення високого рівня ефективності авіаційної техніки (АТ) протягом життєвого циклу виробу є першорядним завданням розробників повітряних суден (ПС) транспортної категорії (ТК).

Одним зі шляхів підвищення ефективності АТ є широке застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), що забезпечує не тільки вагову, але й економічну ефективність протягом усього життєвого циклу експлуатації АТ. Відомо, що ефективність виробу залежить від якості його складових. Створення ефективних конструкцій із ПКМ залежить від правильного вибору конструктивно-технологічних рішень (КТР), конструктивно-силової схеми агрегату, оптимального вибору технологічних процесів виробництва, конструкційних матеріалів і інших факторів. Правильне планування й реалізація етапів підготовки виробництва для виготовлення формоутворювального оснащення, з врахуванням існуючих виробничих умов, визначають якість деталей із ПКМ.

Аналіз світового й вітчизняного досвіду показує перманентне зростання застосування ПКМ у виробках АТ і як наслідок збільшення кількості різноманітних технологічних процесів (ТП) виробництва й переробки композитів у готові вироби. Значні переваги адитивних технологій і безавтоклавних методів формування, що пов'язані з високим коефіцієнтом використання матеріалу, зниженням собівартості виробів і високим ступенем повторюваності при забезпеченні якості, забезпечили їх широке впровадження при виготовленні закордонних літаків компаній Boeing і Airbus.

На кожному етапі життєвого циклу виробу існує раціональна область для прийняття того або іншого рішення. Дотепер не розроблений класифікатор складових комплексу повного життєвого циклу виробу у комплексі із синтезом алгоритму вибору раціональних технологічних процесів виготовлення деталей із ПКМ та аналізом ефективності етапу технологічної підготовки виробництва з описом критеріїв раціонального вибору технологічного оснащення й визначенням впливу етапів підготовки виробництва на собівартість виробів.

У зв'язку із цим, а також зі стійким зростанням обсягів застосування ПКМ у виробках АТ актуальною є розробка наукових основ підвищення ефективності створення конструкцій транспортних літаків із ПКМ на різних етапах життєвого циклу, що є комплексною проблемою підвищення конкурентоспроможності вітчизняних транспортних літаків на світовому ринку продажів і послуг.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основою дисертації є матеріали, які поєднують дослідження, проведені автором протягом 2013-2020 років у рамках реалізації науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт з освоєння й впровадження у виробництво нових прогресивних технологічних процесів, матеріалів і встаткування, спрямованих на реалізацію стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості до 2020 року, затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27.12.2008 року № 1656-р «Про схвалення Стратегії розвитку вітчизняної промисловості на період до 2020 року».

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертації є підвищення вагових, економічних і льотно-технічних характеристик вітчизняних літаків транспортної категорії, які забезпечують їх високу конкурентну здатність шляхом розробки наукових

основ підвищення ефективності створення конструкцій із ПКМ на етапах життєвого циклу виробу.

Для досягнення поставленої мети в дисертації були сформульовані й вирішені такі задачі:

1. Провести аналіз основних проблем розвитку, процесів впровадження й збільшення обсягів використання ПКМ у транспортних літаках.
2. Описати класифікаційні аспекти й розробити комплексний критерій раціонального вибору ТП для виробів із ПКМ.
3. Розробити алгоритм вибору ТП виробництва на підставі часткових складових етапів життєвого циклу виробів.
4. Розробити генеральну класифікаційну таблицю, що враховує теоретичні, технологічні й експериментальні етапи створення виробів із ПКМ із урахуванням принципів підходів по створенню технологічного оснащення й відпрацюванню технологічних процесів виробництва.
5. Розробити критерії вибору основних параметрів технологічного оснащення для різних типів конструкцій із ПКМ і довести їх вплив на якість виробів із ПКМ.
6. Розробити проектний комплекс по оптимізації конструктивно-технічних параметрів ПКМ для підвищення ефективності їх застосування в агрегатах транспортних літаків.
7. Довести вплив технологічних дефектів на якість та ефективність виробів із ПКМ та розробити способи їх зниження для підвищення ефективності композитних конструкцій на етапах життєвого циклу виробу.
8. Визначити ступінь впливу автоматизації технологічних процесів на вартісні показники виробів із ПКМ.

**Методи дослідження.** У розділі 2 реалізовано апарат теорії класифікацій і кваліметрії, експертних оцінок, синтезу критеріальних оцінок ефективного вибору технологічних процесів виробництва виробів із ПКМ. У розділі 3 при обґрунтуванні вибору технологічного оснащення та аналізу економічної ефективності етапів підготовки виробництва використано структурний метод, метод техніко-економічного аналізу та синтезу, експертних оцінок. У розділі 4 використано системний підхід до створення і реалізації раціонального проекту створення виробів АТ із ПКМ. У розділі 5 використано порівняльний метод та експериментальні дослідження на прикладі агрегату крила пасажирського літака, які підтвердили запропоновані методики.

Використані методи, моделі й теорії забезпечили достовірність одержаних результатів і висновків.

**Об'єкт дослідження** - агрегати з полімерних композиційних матеріалів вітчизняних транспортних літаків.

**Предмет дослідження** – складові наукових основ підвищення ефективності виробів із ПКМ транспортних літаків на різних етапах життєвого циклу виробу й синтезу концепції по оптимізації конструктивно-технологічних рішень.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

У науково-методологічному аспекті вперше розроблений напрямок технологічного забезпечення й оптимізації вибору ТП виробництва й підвищення ефективності конструкцій із ПКМ для транспортних літаків, з урахуванням сучасних особливостей вітчизняного виробництва, що включають:

- комплексний аналіз, класифікацію й дослідження широкого спектра технологічних процесів для виготовлення деталей із ПКМ;
- наукове обґрунтування застосування технологічних процесів виготовлення деталей із ПКМ для різних умов виробництва;
- синтез наукових основ підготовки виробництва, що гармонізовані з алгоритмом вибору технологічних процесів;
- встановлення ієрархічного порядку системи виявлення дефектів структури ПКМ, що виникають в процесі підготовки і виробництва виробів із ПКМ;
- синтез залежностей для ефективного впровадження засобів автоматизації основних технологічних операцій процесу виготовлення виробів із ПКМ: розкрою заготовок і формоутворення в комплексі із сучасним програмним забезпеченням для пошарового моделювання конструкцій із ПКМ.

### **Практична значимість одержаних результатів.**

В експериментально-теоретичному й прикладному аспектах уперше розроблені математичні моделі й методи науково-технічного забезпечення створення нових технологічних процесів, обладнання й оснащення для виробництва агрегатів вітчизняних літаків із ПКМ.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що вони дозволили:

- розробити й впровадити інтегральний класифікатор етапів життєвого циклу виробів, що враховує зв'язок технологічних процесів виробництва із застосовуваними матеріалами для оптимізації й раціонального вибору процесів виробництва;
- розробити алгоритм вибору процесів виробництва на підставі часткових складових етапів життєвого циклу виробів;
- розробити генеральну класифікаційну таблицю, що враховує теоретичні, технологічні й експериментальні етапи створення виробів із ПКМ із урахуванням принципів підходів до створення технологічного оснащення й відпрацювання технологічних процесів виробництва;
- обґрунтувати необхідність впровадження високотехнологічного встаткування для зниження обсягу ручної праці й підвищення якості композитних конструкцій з визначенням періодів окупності залежно від темпів виробництва авіаційної техніки;
- одержати результати, які можуть бути використані як керівні технічні матеріали для конструкторських відділів у процесі розробки й впровадження нових КТР деталей агрегатів конструкцій із ПКМ.

**Особистий внесок здобувача** являє собою сформульовані рішення й складові даної науково-технічної проблеми, що містять у собі нові підходи, концепції, принципи й математичні моделі, які стали базовими при створенні наукових основ технологічного забезпечення створення конструкцій із ПКМ для транспортних літаків, відображені в статті [6], 2-х тезах [24,27] опублікованих без співавторства. У колективних публікаціях зі співавторами [4-10,13-15,17,18,24-27] авторові належать ідеї, загальні підходи в вирішенні конкретних завдань, або вони належать співавторам у рівних частках співучасті [1-3,5,11,12,16,19,20-22], а також у патентах на винахід [28-35].

В отриманих науково-технічних результатах, роль автора полягає в консультаціях або загальних прикладних і дослідницьких роботах. Так в [1] автор встановив залежність між швидкістю ковзання та коефіцієнтом тертя у різних діапазонах швидкостей для виробів з «вторинних» композитів; в [2] автором проведений аналіз та доведене перманентне зростання полімерних композиційних матеріалів у конструкціях вітчизняних та закордонних літаках транспортної категорії, що підвищує економічну та вагову ефективність літаків у експлуатації; в [3] на основі виконаних досліджень автором був встановлений зв'язок між експлуатаційними пошкодженнями та дефектами виробів з ПКМ і тими які виникають у процесі виробництва; в [4] автором запропоновано загальну постановку задачі та виконано оцінку ступеня технологічності ремонту з використанням автономного ремонтного обладнання; в [5] автором запропоновані основні критерії ефективного вибору типів полімерних композиційних матеріалів з урахуванням принципів технологічності при виготовленні виробів; в [7] автором організована робота з виготовлення зразків склопластику за технологією *resin film infusion* та проведений аналіз результатів фізико-механічних випробувань зразків пластику, визначена ефективність запропонованої технології; в [8] автором сформовані вимоги до сучасного технологічного оснащення, організована та проведена експериментальна робота на підставі якої, розроблено та запропоновано ряд рекомендацій по використанню оснащення в серійному та одиничному виробництві; в [9] автором синтезовані залежності необхідної кількості автоматизованого технологічного обладнання (лазерних проекторів та розкрійних машин) для забезпечення виробництва в залежності від програми випуску літаків; в [10] на основі аналізу закордонних досягнень, автором доведена необхідність використання сучасних технологій виробництва виробів з ПКМ, пов'язаних із впровадженням систем пошарового моделювання та високотехнологічного обладнання; в [11] автором проведені експериментальні роботи з метою визначення впливу швидкості різання на якість обробленої поверхні зразків з композиційних матеріалів; в [12] автором сформульовано дві з семи проблем створення композитних конструкцій, а саме: залежність фізико-механічних властивостей композиту від технологічного процесу його створення, та необхідність забезпечення високого рівня повторюваності компонентів композиту та необхідність забезпечення методів неруйнівного контролю для виробів з полімерних композиційних матеріалів; в [13] автором запропоновано загальну постановку задачі та виконано аналіз можливості впровадження клеїв у конструкції літаків «Ан» та визначено напрямки для їх використання ; в [14] автором досліджено вплив домішок на здатність збільшувати властивості змочування скло-, та вуглецевих волокон у процесі виготовлення препрегів; в [15] автором зроблено комплексний аналіз сучасних технологічних методів виробництва конструкцій із полімерних композиційних матеріалів. Зроблено акцент на динамічному розвитку адитивних технологій та процесів зварювання виробів з термопластичних матеріалів та необхідності їх використання з метою підвищення ефективності літаків «Ан»; в [16] автором проведений аналіз специфічних властивостей конструювання з'єднань деталей з полімерних композиційних матеріалів та сформульовано особливості, які потрібно враховувати при проектуванні та виборі типів з'єднань, а саме: товщину деталей, низькі характеристики на зминання та зріз, відмінність коефіцієнтів лінійного температурного розширення та інші; в [17] автором розроблено сучасний кла-

сифікатор технологічних процесів для композитних виробів та синтезована загальна блок-схема складових концепції створення нових цивільних літаків, частковим випадком якої є виробництво агрегатів з полімерних композиційних матеріалів; в [18] на основі проведеного аналізу, автором надано опис сучасної тенденції застосування термопластичних матеріалів у сучасній галузі авіабудування; в [19] виконано аналіз розвитку нових конструктивно-технологічних рішень крил літака з композиційних матеріалів, які мають високий технічний та економічний потенціал; в [20] автором синтезовані складові формування комплексного критерію другого рівня ефективності ПКМ на етапах створення конструкції; в [21] автором організовано виготовлення зразків вуглепластиків на основі високотемпературного сполучника та проведено випробування зразків; в [22] прийнята участь в розробці високотемпературного сполучника на основі бісфталонітрилу з метою його впровадження в конструкції літаків «Ан»; в [23] автором проведений комплексний аналіз сучасного стану та розвитку Державного підприємства «АНТОНОВ», зокрема в галузі полімерних композиційних матеріалів; в [24] проаналізовані першопричини впровадження полімерних композитів у конструкції літаків «Ан» та сформульовані перспективні напрямки розвитку; в [26] автором сформульовані напрямки співпраці з Національною академією наук України в сфері розробки нових матеріалів, технологічних процесів, інструменту, тощо. Зроблено акцент на унікальній системі підготовки молодих кадрів на Державному підприємстві «АНТОНОВ» з Національним аерокосмічним університетом ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»; в [28] автором запропоновано використання гумової суміші для формування підсилюючого елемента конструкцій з полімерних композиційних матеріалів для повітряних суден; в [29] запропоновано та впроваджено модифікацію композиції для виготовлення підсилюючих елементів повітряних суден; в [30] автором запропоновано використати розділову плівку з липким шаром для запобігання адгезії компонентів формуючої суміші з поверхнею технологічного оснащення; в [31] для отримання питомої міцності та жорсткості підсилюючого елемента автором запропоновано використання стільникового заповнювача в якості основи для заливання композиції; в [32] автором запропоновано використання скляних мікросфер у рецептурі сінпрегу для підвищення характеристик суміші, що використовується для формування підсилюючого елемента повітряного судна; в [33] автором запропоновано використати антиадгезійну рідину марки Frekote для підвищення якості формоутворюючої поверхні; в [34] запропонована попередня викладка препрегу в зонах отворів для більш якісного формування деталі; в [35] запропоновано використати композицію марки Aircast 3700 A/B у якості формувального елемента.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати багаторазово доповідалися автором на міжнародних і українських конференціях і семінарах, у тому числі: на XVII Українській конференції з космічних досліджень (м. Одеса, 2017 р.); JRC Conference (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній конференції «Розвиток виробництва, нового обладнання й нових можливостей і матеріалів» (Ningbo, Китай 2017 р.); Міжнародній конференції «Science and Technology Achievement Promotion Conference» (Ningbo, Китай 2018 р.), XII міжнародних молодіжних науково-технічних читаннях ім. А.Ф. Можайського (м. Запоріжжя, 2019 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Херсон, 2019 р.), Міжнародній конференції Composite Ukraine 2020 (м. Ірпінь,

2020). В цілому результати роботи доповідались на міжнародному Форумі інженерів та механіків, присвяченого 110-річчю з дня народження академіка Г.С. Писаренка.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 35 наукових працях, включаючи 20 статей у наукових фахових виданнях, з яких 16 входять до наукометричної бази даних Index Copernicus International і міжнародних збірників категорії «А»; 8 патентів України; 7 тез доповідей на конференціях різного рівня.

Сторінка автора в реферативній базі Google Scholar (user=JUMkQwUAAAAAJ&hl)

Унікальний ідентифікатор науковця (Open Researcher and Contributor ID - ORCID): 0000-0003-2767-4884.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 341 найменування і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 333 сторінки машинописного тексту, у тому числі основний текст дисертації містить 254 сторінки й включає 85 ілюстрацій і 41 таблицю.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, її наукова новизна й практична значимість, описаний особистий внесок автора, наведена інформація про апробацію, публікації й структуру роботи.

У першому розділі проведений аналіз становлення й розвитку полімерних композиційних матеріалів у вітчизняній галузі авіабудування. Показано, що перші результати впровадження склопластикових виробів були отримані завдяки вченим Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», фахівцям ВІАМ і Генеральному конструктору О.К. Антонову, що заклав основи застосування ПКМ не тільки в літаках марки «Ан», але й у літаках інших КБ СРСР. Під його керівництвом були розроблені перші конструктивно – технологічні рішення для літаків Ан-3, Ан-28, Ан-22 «Антей», Ан-72, Ан-124 та ін. Зростання обсягів застосування ПКМ у літаках марки «Ан» показано на рисунку 1.

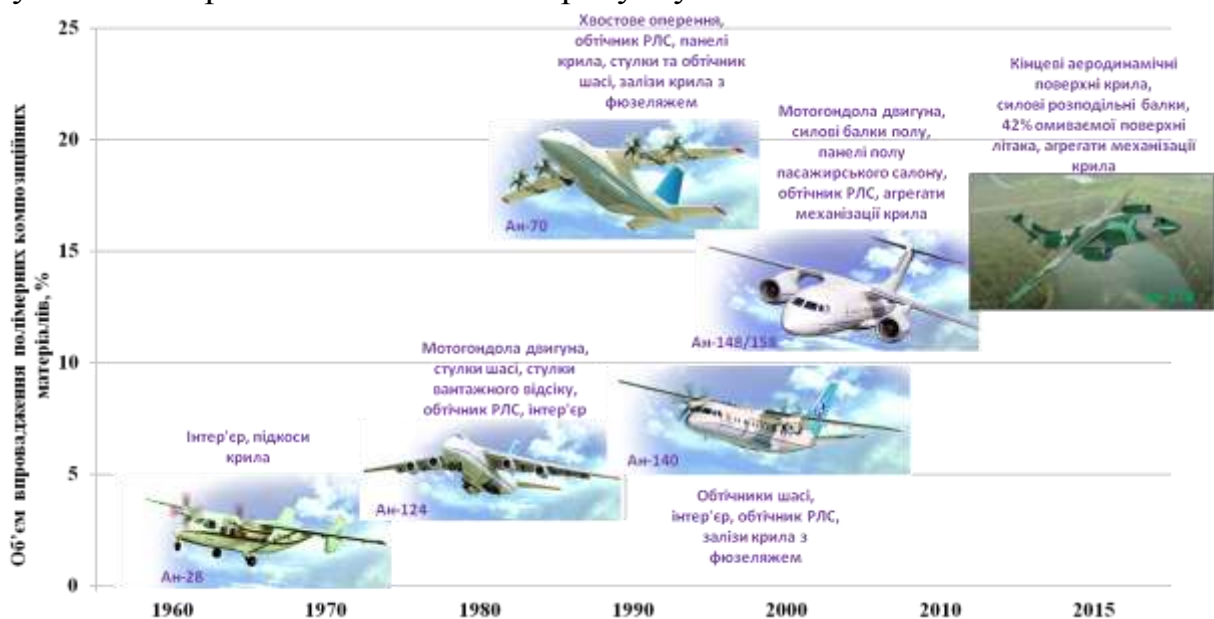


Рисунок 1 – Обсяги застосування ПКМ у літаках сімейства «Ан».



У наш час спостерігається перманентне зростання обсягів застосування ПКМ у виробках АТ, про що свідчить збільшення обсягів споживання скляних і вуглецевих волокон у світі (рисунок 2). Збільшення обсягів застосування ПКМ сприяло розвитку нових ефективних технологічних напрямків виробництва виробів: адитивних технологій, безавтоклавних методів виробництва та виготовлення деталей з ПКМ на основі термопластичних матриць.

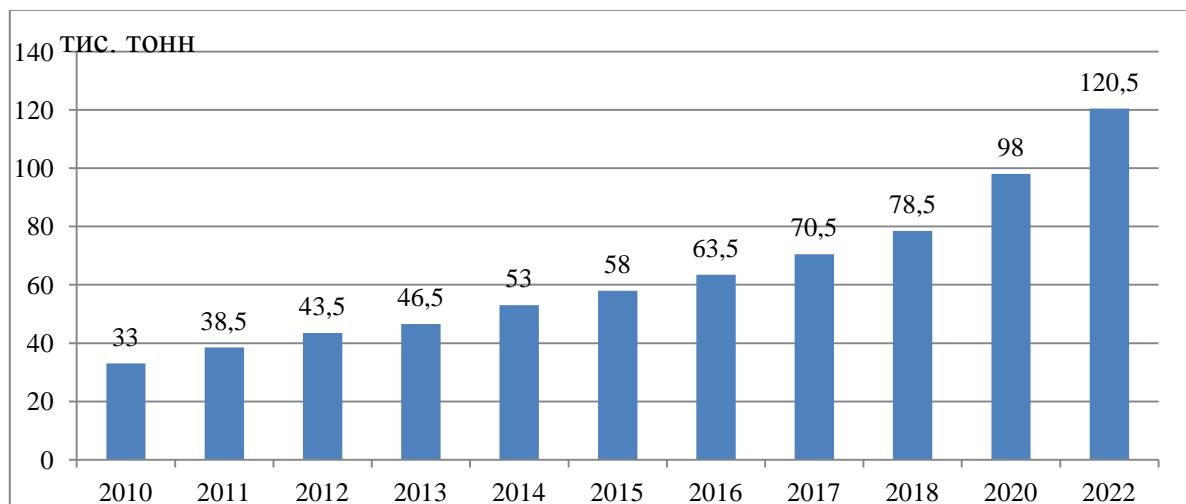


Рисунок 2- Прогнозоване споживання вуглецевих волокон у світі

Однак, незважаючи на активний розвиток ПКМ у різних галузях машинобудування, особливо в авіабудуванні, одержання ефективних і якісних виробів пов'язане з рядом проблем, які необхідно вирішувати на різних етапах життєвого циклу виробу (таблиця 1).

У розділі проведений аналіз факторів проблематики застосування ПКМ для виробів авіаційної техніки, основними з яких є: проектувальний, виробничий, економічний, експлуатаційний і екологічний фактори. У результаті аналізу цих факторів запропоновано ряд рішень для їх вирішення у загальному вигляді.

Таблиця 1 - Основні фактори проблематики застосування ПКМ

Тип фактора	Опис фактора	Варіанти рішення
Проектувальний	Вибір раціональних КСС і КТР, забезпечення експлуатаційної технологічності, необхідність застосування спеціалізованого програмного забезпечення при проектуванні конструкцій із ПКМ	Підготовка техніко-економічного обґрунтування й оцінка ризиків і окупності дорогого програмного забезпечення. Пошарове моделювання дозволяє оптимізувати конструкції із ПКМ і відкриває шлях до автоматизації ТП розкрою, викладення, намотування. Застосування принципів варіантного й раціонального проектування.
Економічний	Вартість сировини й компонентів, відсутність вітчизняної сировинної бази, необхідність у спеціалізованому дорогому обладнанні.	Уніфікація номенклатури матеріалів. Підвищення коефіцієнту використання матеріалу. Необхідна комплексна програма розвитку хімічної промисловості на рівні держави. Застосування безавтоклавних технологій.

## Продовження таблиці 1

Тип фактора	Опис фактора	Варіанти рішення
Виробничий	Необхідність спеціально навченого персоналу, необхідність енергоємного обладнання, забезпечення технологічності виробництва	Організувати своєчасне навчання й атестацію персоналу та відвідування тематичних тренінгів. Можливість використання типових процесів. Можливість механізації й автоматизації ТП. Застосування безавтоклавних технологій.
Експлуатаційний	Контроль і ремонт в експлуатації, довговічність, надійність і ресурс конструкцій у циклі ресурсу літака	Раціональне членування агрегатів і введення стиків. Забезпечення взаємозамінності агрегатів, застосування стандартизованих і уніфікованих елементів конструкцій і кріплення. Впровадження датчиків контролю за станом конструкції в експлуатації.
Екологічний	Зниження впливу шкідливих і небезпечних факторів на здоров'я робочого персоналу. Утилізація відходів виробництва.	Забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту. Контроль параметрів повітряного середовища (температури, вологості, чистоти). Проведення НДР по впровадженню аналогічних, сучасних і менш шкідливих матеріалів. Заміна традиційних розчинників (ацетон, бензин) на менш шкідливі

Показано, що ці складові життєвого циклу є основою для нового наукового напрямку - підвищення ефективності виробництва виробів із ПКМ на різних етапах життєвого циклу виробу. На підставі проведеного аналізу сформульовані мета й завдання дисертації.

У другому розділі на підставі виконаного аналізу класифікацій технологічних процесів виробництва виробів із ПКМ, автором розроблена дворівнева класифікація ТП виробництва конструкцій із ПКМ, що враховує сучасні тенденції застосування нових матеріалів, операції з підготовки й налагодження обладнання, що передбачують завантаження матеріалу для розкрійних і викладальних машин, завантаження файлів розкрою або укладання, позиціонування оснащення перед роботою з лазерними проекторами. Група основних процесів значно розширилася за рахунок появи й розвитку двох нових груп: безавтоклавних методів виробництва й адитивних технологій (рисунок 3).

Доведено, що універсальним засобом підвищення якості виробів із ПКМ є автоматизація технологічних процесів. Підвищення рівня автоматизації дозволяє досягти стабільних заданих фізико-механічних характеристик конструкцій, зменшити обсяги ручної праці, скоротити виробничі цикли та зменшити собівартість технологічної підготовки виробництва. Однак, суттєвою перешкодою для впровадження високотехнологічного автоматизованого обладнання є необхідність значних капіталовкладень на його придбання, строки окупності якого значно знижує динаміку ефективності впровадження композитів у výroбах авіаційної техніки.

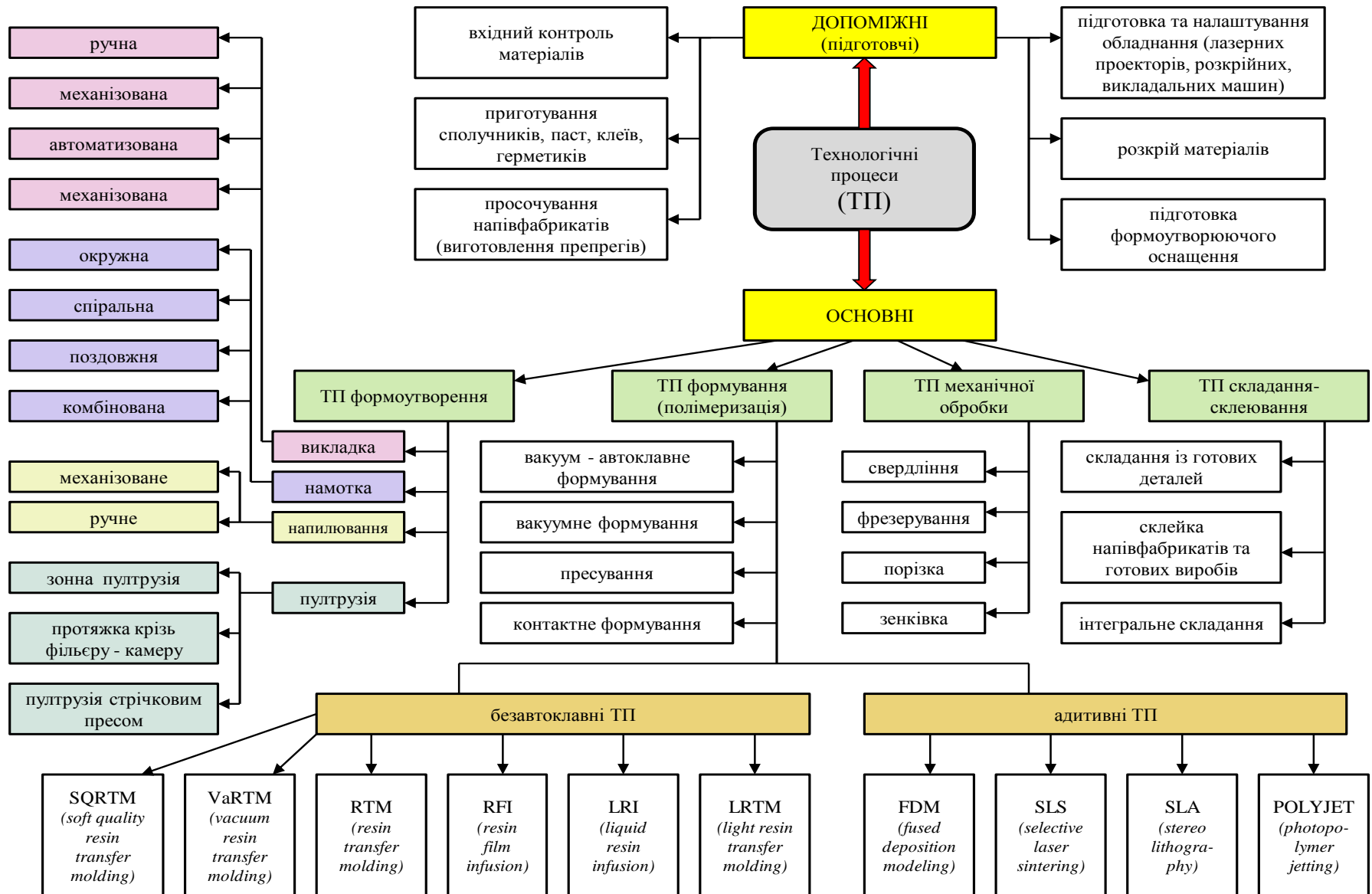


Рисунок 3 - Схема загальної дворівневої класифікації ТП для виробів із ПКМ

Проведено огляд і аналіз класифікаційних аспектів раціонального вибору типів конструкцій із ПКМ. На підставі аналізу розроблений класифікатор виробів із ПКМ із урахуванням технологічних процесів їх виготовлення, як однієї із складових конструкцій транспортних літаків. На підставі викладеного концептуального підходу до синтезу класифікації виділено 7 груп етапів життєвого циклу виробів із ПКМ (рисунк 4) і представлена докладна декомпозиція кожної групи, включаючи етап утилізації виробів.

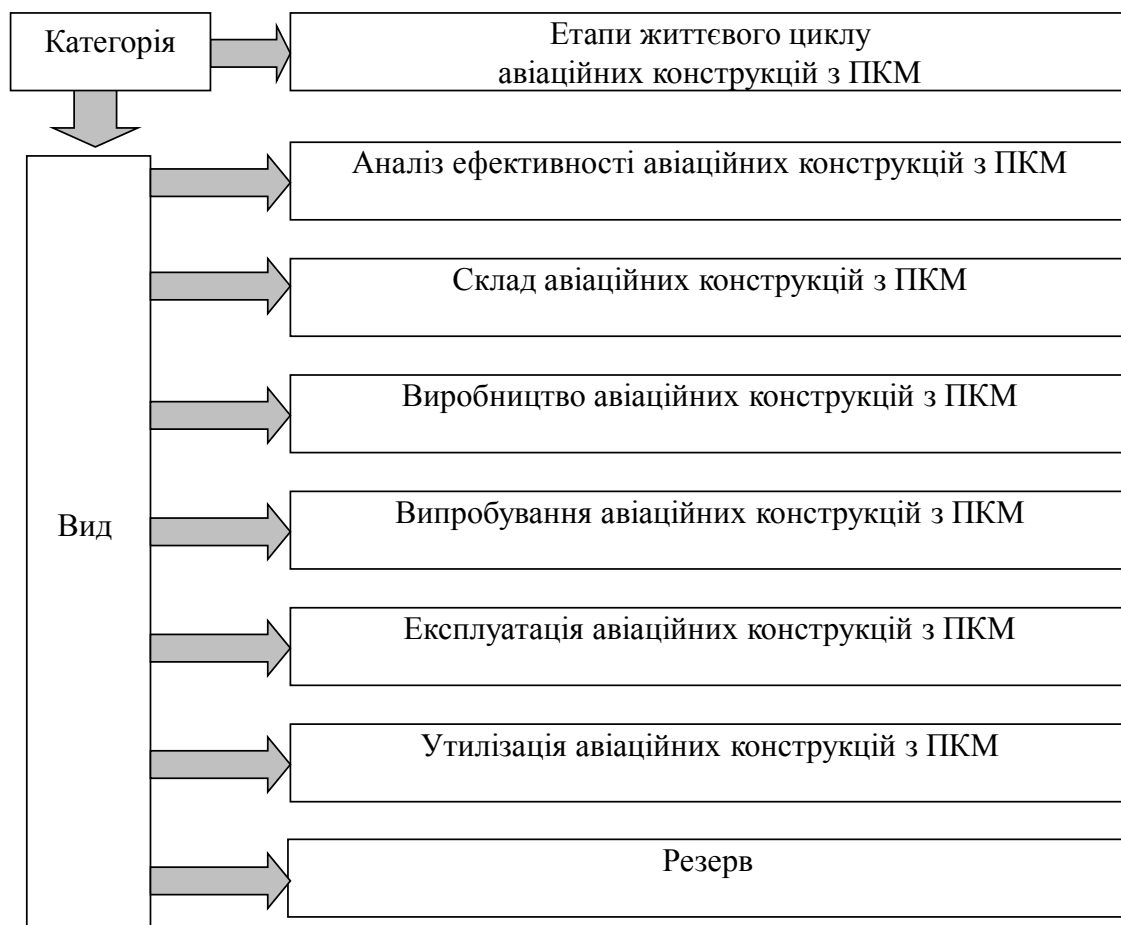


Рисунок 4 - Декомпозиція класифікатора категорії «Етапи життєвого циклу конструкції із ПКМ»

Важливою проблемою є вибір системи критеріїв, що дозволяють для кожного розглянутого рівня проектних завдань, для кожного елемента підсистеми обирати такі параметри й характеристики, які б забезпечували високу ефективність системи в цілому. Для цього необхідно скористатися принципом оптимальності: якщо об'єкти елементів і підсистем всіх рівнів оптимальні за критеріями, що відповідають системам більш високого рівня, то вся система оптимальна. Це означає, що хоча кожному етапу може відповідати свій критерій оцінки, всі вони повинні бути такими, що не суперечать один одному, відповідаючи загальним цілям створення ефективного виробу.

Для кожного з етапів життєвого циклу розроблена декомпозиція кожного виду з описом повного обсягу робіт по ефективному застосуванню виробів із ПКМ в агрегатах авіаційної техніки протягом життєвого циклу виробу.

Декомпозиція першого виду «Аналіз ефективності виробів із ПКМ» представлена на рисунку 5. Аналогічні декомпозиції розроблені для кожного етапу життєвого циклу виробу.

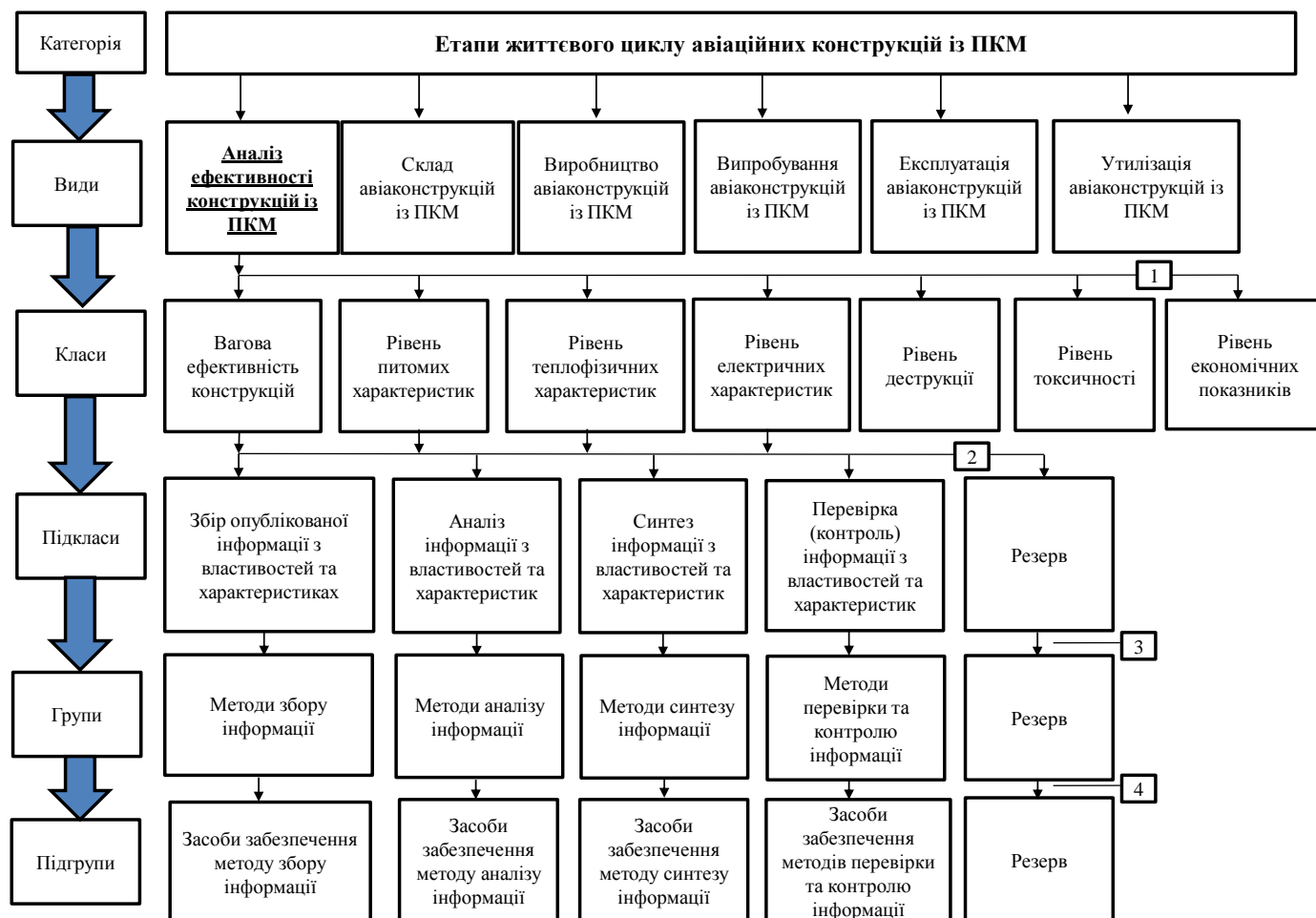


Рисунок 5 – Декомпозиція класифікатора виду «Аналіз ефективності авіаконструкцій із ПКМ»

У рамках вирішення проблеми розробки алгоритму вибору технологічних процесів проведений аналіз складових критеріїв для формування ефективних ТП виробництва. Визначено, що рівень критеріїв формується певними факторами й визначається ними. На рисунку 6 показаний вплив ряду критеріїв на оптимальність ухвалення рішення про вибір ТП, з урахуванням факторів, якими ці критерії визначаються, серед яких:

- $K_{КТР}$  – критерій, що описує конструктивно-технологічне рішення й технологічність конструкції;
- $K_{ТПВ}$  – критерій обсягу (складності) технологічної підготовки виробництва для виробів із ПКМ;
- $K_{ТР}$  – критерій трудомісткості перетворення напівфабрикату в конструкцію;

- $K_{авт.}$  - критерій ступеня автоматизації технологічного процесу;
- $K_{в}$  – критерій вартості, що визначає інтегральні фінансові витрати на створення одиниці маси конструкції із ПКМ;
- $K_{б}$  – критерій безпеки, що визначає ступінь відсутності шкідливих впливів на оператора й навколишнє середовище в процесі виготовлення й експлуатації конструкції із ПКМ;
- $K_{тех}$  – критерій технологічності конструкції із ПКМ.

У кожного критерію ці фактори різні. Критерії  $K_{в}$ ,  $K_{б}$ ,  $K_{тр}$ ,  $K_{тех}$ ,  $K_{ТПВ}$ ,  $K_{авт.}$ , що формують  $K_{ТП}$ , є взаємозалежними, тобто рівень кожного з них залежить у тій чи іншій мірі від рівня інших.

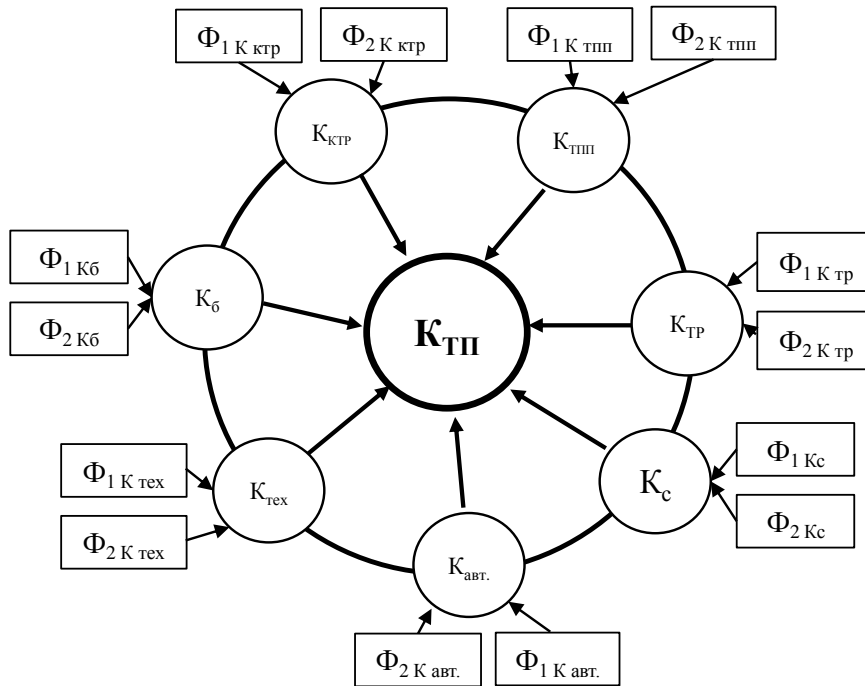


Рисунок 6 - Взаємозв'язок критеріїв ефективності технологічних процесів

Зміст формули (1) полягає в тому, що ухвалені рішення, повинні забезпечувати рівень  $K_{ТП}$  із мінімальним рівнем  $K_{в}$  у поєднанні з максимальним рівнем  $K_{б}$  і  $K_{авт.}$ , що забезпечують припустимі рівні  $K_{тех}$ ,  $K_{тр}$  і  $K_{ТПВ}$ .

$$\left[ \begin{array}{ccc} & \begin{array}{c} \rightleftarrows K_{тех} \rightleftarrows \\ \updownarrow \\ \updownarrow \\ \rightleftarrows K_{б} \rightleftarrows \end{array} & \\ \begin{array}{c} K_{авт.} \\ \updownarrow \\ K_{тр.} \end{array} & & \begin{array}{c} K_{КТР} \\ \updownarrow \\ K_{ТПП} \end{array} \end{array} \right] \rightarrow [K_{ТП}] \quad (1)$$

При цьому причини цього вибору можуть носити різний характер, заснований на базі того або іншого поняття ефективності (технічної, економічної, стратегі-

чної). Однак цей рівень може неоднозначно забезпечуватися різними поєднаннями рівнів інших критеріїв ефективності вибору типу ТП для конкретного агрегату.

Синтез комплексного критерію ефективного вибору типу ТП для конструкцій цивільних літаків є досить складною багатоаспектною проблемою, що вирішувалася тільки в рамках критерію максимального підвищення питомих характеристик несної здатності, що визначає вагову віддачу конструкції без врахування впливу на нього інших критеріїв.

**У третьому розділі** проведений аналіз основних показників і складових технологічної підготовки виробництва (ТПП) виробів із ПКМ.

Доведено, що етапи ТПП безпосередньо впливають на якість виробів із ПКМ. Основними складовими якості формоутворюючого оснащення є: якість прийнятих КТР для оснащення в процесі проектування, якість застосовуваних матеріалів, якість виготовлення (точність верстатів з ЧПУ, інструмента та ін.) та якість складання оснащення, коректність і точність вимірів.

За результатами виконаного аналізу синтезована схема інтегральної структури ТПП авіаційних конструкцій із ПКМ (рисунок 7), що включає необхідність впровадження принципів ощадливого виробництва з метою підвищення ефективності етапів підготовки виробництва виробів із ПКМ.

Виконано комплексний аналіз можливості застосування різних типів матеріалів майстер-моделей для виготовлення формоутворюючого оснащення. Для визначення величин відхилень проведені практичні дослідження на прикладі агрегату крила транспортного літака. Для цього були виготовлені майстер-моделі ідентичного контуру з різних матеріалів: з деревини (сосна) і полімерної плити W0700, виробництва ф. «RAMPF», Німеччина. Попередньо була зроблена розмітка майстер-моделей і виконані виміри відхилень геометричних розмірів виготовлених майстер-моделей від еталонної математичної моделі в певних розмічених точках до й після формування оснащення (рисунок 8).

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки:

- однорідність поля відхилень від теоретичної поверхні спостерігається на майстер-моделі, виготовленій з полімерної плити, на майстер-моделі з деревини можна спостерігати різкі перепади відхилень у деяких точках;

- величина відхилень від теоретичного контуру на майстер-моделі, виготовленій з полімерної плити перебуває в межах 0,25 мм, на відміну від майстер-моделі, виготовленій з деревини, де відхилення досягають 0,7 мм, що свідчить про більш високу точність і якість поверхні майстер-моделі з полімерної плити;

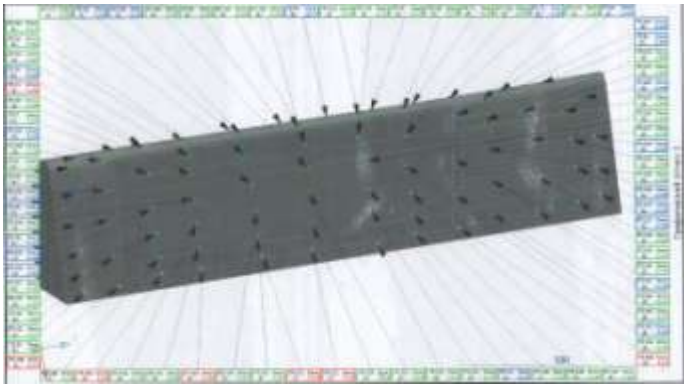
- при проектуванні оснащення необхідно враховувати різну особливість розподілу КЛТР на дерев'яних і полімерних майстер-моделях: після термообробки дерев'яні майстер-моделі мають властивість усаджування, полімерні плити - розширення (рисунок 9). Дана особливість може бути корисна, наприклад, при зніманні деталі або оснащення з майстер-моделі.

- при технологічній підготовці серійного виробництва необхідно забезпечувати високу якість усього комплексу оснащення, яка виключає ручне доведення поверхні деталей, що виготовляються. При цьому використання полімерних матеріалів, не зважаючи на їх високу вартість, також доцільно.



Рисунок 7 - Схема інтегральної структури технологічної підготовки виробництва авіаційних конструкцій із ПКМ





а)



б)

Рисунок 8 - Графічні результати вимірів відхилень майстер-моделей:  
а) майстер-модель із деревини; б) майстер-модель із полімерної плити

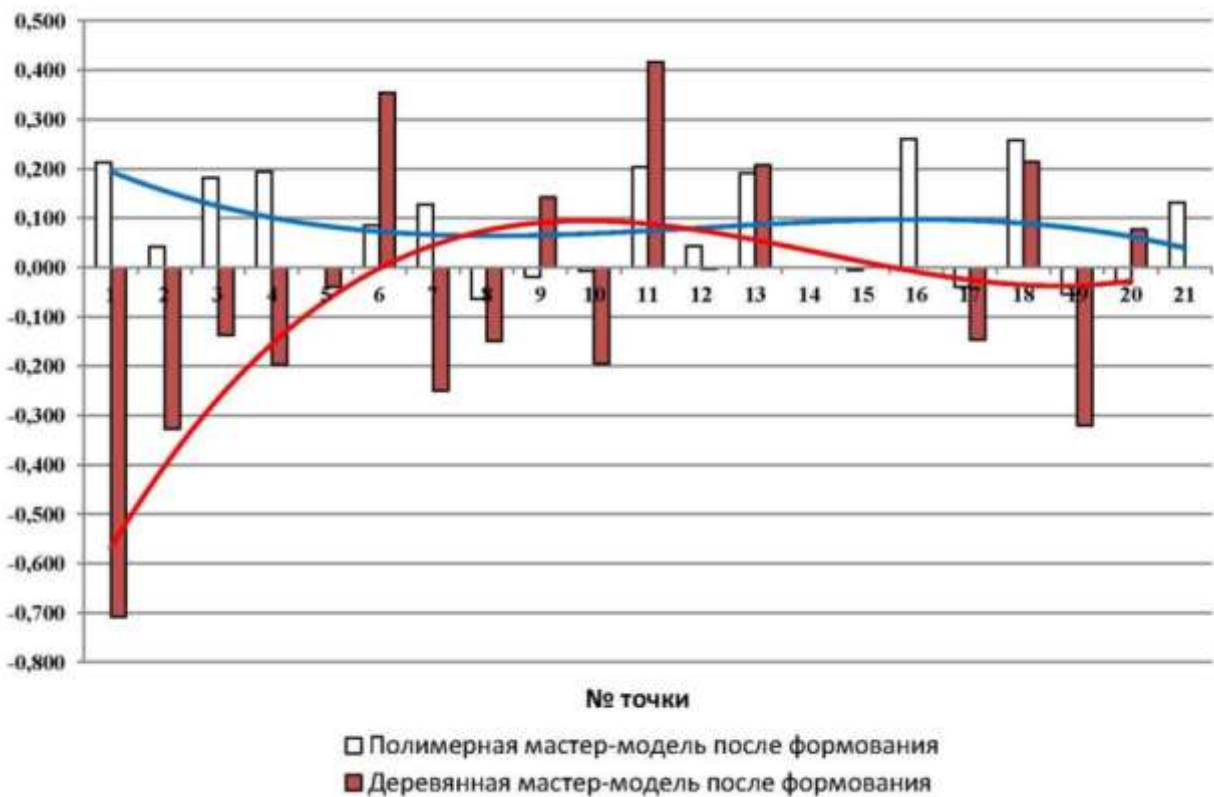


Рисунок 9 - Порівняння відхилень геометричних розмірів майстер-моделей після формування оснащення

Доведено вплив критерію проектування конструкцій на собівартість кінцевого виробу через зростання вартості ТПВ. Розглянуто конкретні приклади й проаналізовані недоліки, які були допущені при проектуванні й виготовленні деяких агрегатів літаків. Запропоновано альтернативні КТР для підвищення ефективності виробництва й зниження циклів виготовлення деталей. Описано нові підходи для зниження собівартості виробів, що випускаються серійно, а також запропоновані шляхи по скороченню тривалості циклу ТПВ. Розроблено нові КТР для виготовлення конструкцій типу обтічників шасі, залізів крила з фюзеляжем із забезпеченням якісної профор-

мовки зон люків та запропоновано нові КТР для оснащення з використанням еластичних формуючих елементів.

Одним зі способів підвищення ефективності виробництва є впровадження принципів ощадливого виробництва (англ. *lean production, lean manufacturing*). Основа концепції *lean-виробництва* - оцінка цінності продукту для кінцевого споживача, на кожному етапі його створення. Основним завданням ощадливого виробництва є створення процесу безперервного усунення втрат і позбавлення організації від будь-яких непродуктивних витрат у процесі виробництва які не створюють цінності для кінцевого споживача.

Виготовлення технологічного оснащення й проектування технологічних процесів займає основний обсяг ТПВ - 50% і 17% відповідно. Раціонально вважати, що на даних етапах необхідно сконцентрувати більше уваги для усунення втрат і підвищення ефективності етапів ТПВ для виробів із ПКМ.

У зв'язку із цим, описані основні види втрат на виробництві й інструменти для їхнього усунення або зниження їхнього рівня (рисунок 10).

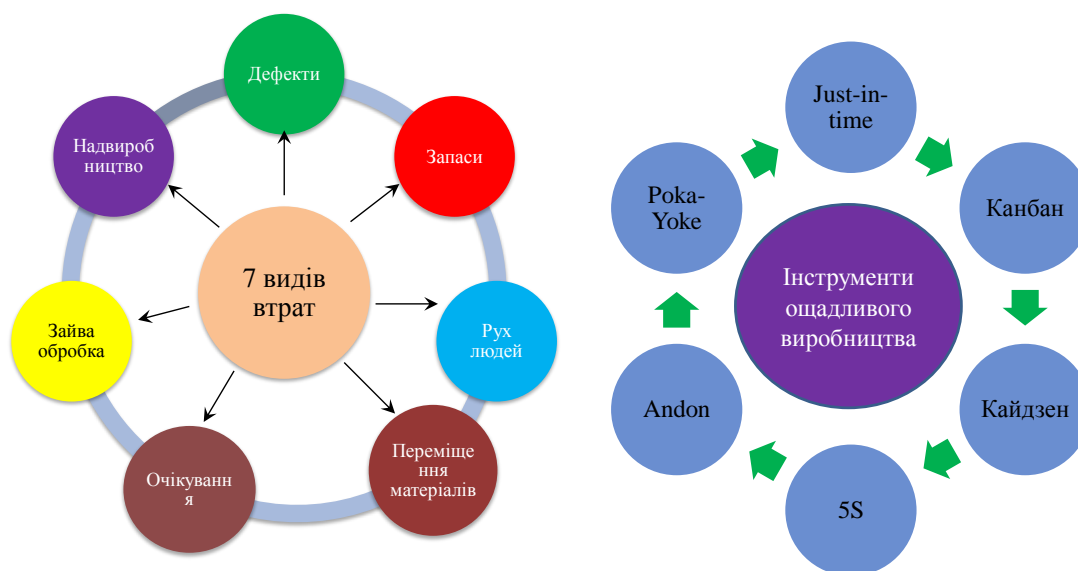


Рисунок 10 – Види втрат і інструменти ощадливого виробництва

Запропоновано заходи щодо впровадження принципів *lean* на виробництві, серед яких наступні (але не обмежуючись ними):

- проведення комплексного аналізу й критичної оцінки необхідності кожної дії в ході розробки ТП і виготовлення оснащення; важливо залучати до цих процесів всіх зацікавлених осіб;
- збір, аналіз і оцінка пропозицій по вдосконалюванню процесів;
- визначення ступеня першочерговості введення змін, визначення необхідних ресурсів і тимчасових періодів; однією з розповсюджених помилок є вважати, що *lean* не вимагає додаткових інструментів, інвентарю або обладнання. Високоякісні інструменти часто приводять до скорочення тимчасових витрат на виконання виробничих операцій;

- приступаючи до впровадження принципів *lean* необхідно пам'ятати про принцип *Kaidzen*, що дозволяє постійно вдосконалювати вже досягнуті результати. Помилково вважати, що робота із впровадження принципів ощадливого виробництва є одноразовою. *Lean* потребує постійної ітерації й оцінки, удосконалювання процесів вимагає від працівників постійного залучення й прагнення до підвищення якості виробничих процесів.

У четвертому розділі вперше сформовані основні складові для формування раціонального проекту по створенню композитних агрегатів транспортних літаків. На підставі проведеного аналізу описана концепція по реалізації раціонального проекту створення виробів із ПКМ, укрупнена блок-схема якої представлена на рисунку 11.

Сутність пропонованої концепції полягає в наступному:

- інтегрована комп'ютеризація життєвого циклу проектного виробу, містить у собі одночасне вирішення завдань проектування, технології виробництва, експлуатації, екології й безпеки виробничої життєдіяльності;
- науково-обґрунтоване прогнозування гранично можливого підвищення ефективності агрегатів АКТ із урахуванням існуючого рівня їх виробництва;
- визначення типових дефектів і встановлення їхньої потенційної небезпеки для функціонування виробів в експлуатації.

Блок-схема містить у собі всі п'ять складових оптимізації проектних параметрів виробів із ПКМ, кожна з них містить ряд взаємозалежних груп різного рівня, описаних у декомпозиції класифікатора життєвого циклу авіаконструкцій із ПКМ (рисунок 5).

Для максимального підвищення ефективності агрегатів авіаційної техніки із ПКМ для існуючого рівня їх виробництва розроблений проектний комплекс реалізації запропонованої концепції з урахуванням вимог технічного завдання (рисунок 12), як вихідного документа на проектування виробів з урахуванням прийнятих принципів оптимізації конструкцій: синтезу раціональної КСС; пошуку раціонального розподілу конструкційного матеріалу з урахуванням діючих навантажень; безпосередньою оптимізацією параметрів елементів силових конструкцій.

Визначено, що ефективним методом пошуку раціональної КСС є синтез КСС по раціональному розподілу конструкційного матеріалу. Для цього розглядається континуальна модель конструкції, що містить у собі всі можливі варіанти КСС. Далі розглядається завдання раціонального розподілу конструкційного матеріалу. Аналіз можливості укладання шарів армуючого матеріалу в напрямку передачі головних зусиль дозволяє синтезувати раціональну КСС. Важливу роль у цьому процесі відіграє програмне забезпечення, зокрема, модуль пошарового моделювання, який дозволяє врахувати характеристики моношару конструкції та провести комплексні розрахунки на міцність конструкцій з ПКМ, однак на ряду з цим метод кінцевих елементів, як один з поширених методів вирішення задачі механіки деформує мого твердого тіла, також надає високу точність напружено-деформованого стану, що дозволяє проаналізувати особливості роботи КСС та виявити небезпечні зони конструкції.

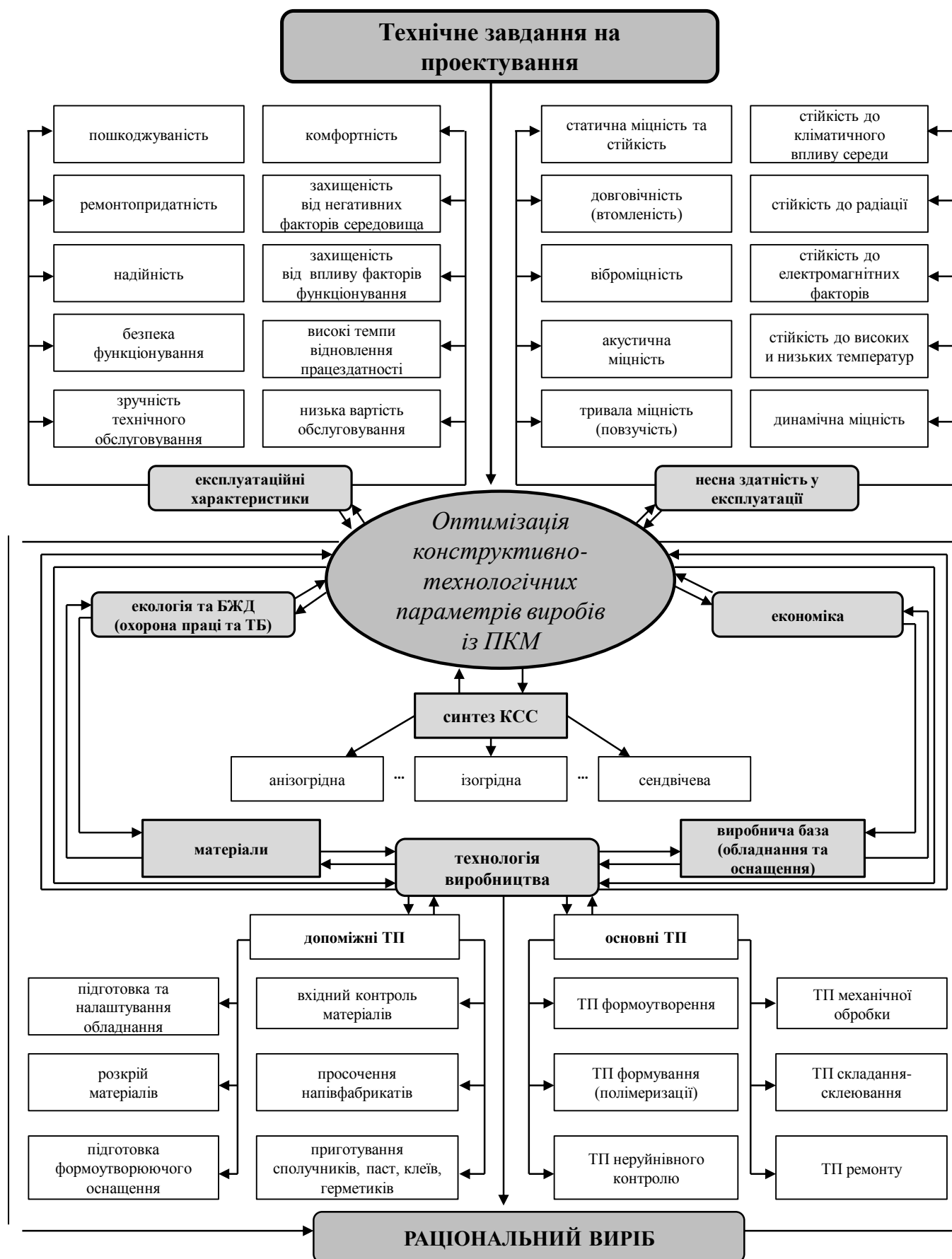


Рисунок 11 - Укрупнена блок-схема концепції реалізації раціонального проекту створення виробів із ПКМ

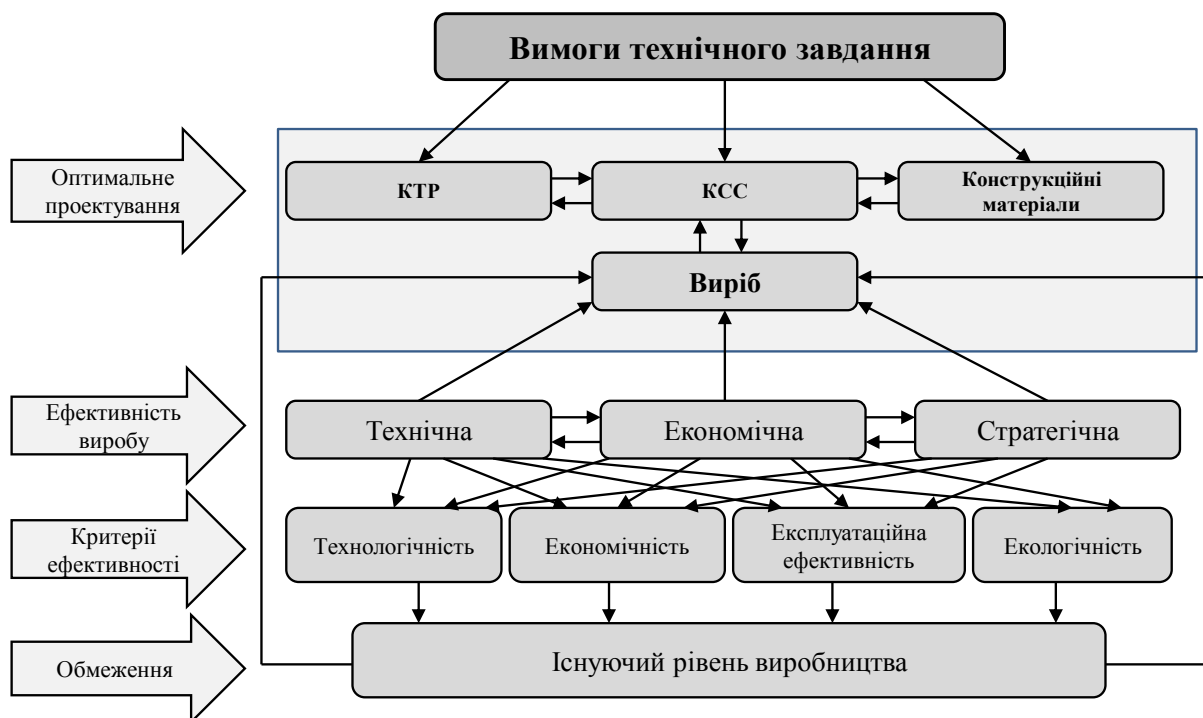


Рисунок 12 - Проектний комплекс оптимізації конструктивно-технологічних параметрів виробів із ПКМ

Розроблено методику вибору раціональної конструктивно-силової схеми конструкцій із ПКМ шляхом вирішення завдання в постановці математичного програмування (симплекс-методом). Складність обчислювального синтезу КСС полягає в труднощі математичного опису особливостей композитних конструкцій, тому що композит має анізотропну структуру й необхідно враховувати властивості міцності композита в напрямках дії навантажень і відповідного укладання шарів армуючого наповнювача. Тому вирішення таких завдань, без застосування спеціалізованих програмних продуктів утруднене й може вирішуватися непрямими методами, одним із яких є визначення силової ваги конструкції.

Величина силової ваги конструкції дорівнює

$$G = \int_v \sigma_{\max}^{\text{екв}} dv, \quad (2)$$

де  $\sigma_{\max}^{\text{екв}}$  - максимальна еквівалентна напруга в даній точці конструкції у всіх випадках навантаження;  $v$  – обсяг матеріалу конструкції, що менше залежить від розподілу матеріалу по елементах конструкції й повністю визначається КСС. Чим раціональніша конструкція, тим менша її силова вага.

Варіанти можна порівнювати по величині силової ваги. Для цього досить для кожного варіанта силової схеми призначити початковий розподіл матеріалу із загальних міркувань, потім виконати однократний розрахунок напруженого стану й під-

рахувати силову вагу. Менша величина силової ваги визначить вигідний варіант силової схеми.

Для визначення оптимальної конструкції вважаємо заданими разом з характерними зонами на ній зовнішні навантаження. На поверхні конструкції задаємо безліч точок, положення яких визначається їх координатами. Назвемо ці точки припустимими й всі розглянуті в завданні конструкції будемо пов'язувати тільки з такими точками. Припустимі точки, до яких прикладені навантаження, будемо називати точками навантаження. Кожна пара припустимих точок визначає припустимий стрижень. Якщо число припустимих точок  $m$ , то гранична кількість припустимих стрижнів

$$n = C_m^2 = m(m - 1)/2 \quad (3)$$

Довжина кожного стрижня, що з'єднає  $i$ -й і  $j$ -й вузли, є відстань між відповідними точками:

$$l_j = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{1/2} \quad (4)$$

Кожному стрижню відповідає площа поперечного перерізу  $F_i$ , модуль Юнга  $E_i$ , а також допустимі напруження  $[\sigma]$  при розтяганні й стиску.

Зусилля в  $j$ -му стрижні позначимо  $S_j$ . Для простоти, але не обмежуючи спільноти, будемо вважати, що вся конструкція виготовлена з одного матеріалу. Набір з'єднаних стрижнів будемо називати припустимою конструкцією стосовно даного навантаження, якщо виконані наступні умови:

- конструкція містить у собі всі точки навантаження;
- конструкція геометрично незмінна стосовно даної системи навантажень;
- конструкція задовольняє умовам міцності.

Завдання полягає у виборі з множини припустимих конструкцій, конструкції мінімальної маси. Вираз для маси стрижневої конструкції має вигляд

$$M = \rho \cdot \sum_{j=1}^n F_j \cdot l_j, \quad (5)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу.

З урахуванням умов міцності вираз (5) запишемо як

$$M = \frac{\rho}{[\sigma]} \sum_{j=1}^n |S_j| \cdot l_j \quad (6)$$

Припустима конструкція повинна перебувати в рівновазі. Умовою рівноваги стрижневої системи є рівновага її вузлів. Кількість рівнянь рівноваги  $k=3m$  (для плоского завдання  $k=2m$ ). Система рівнянь рівноваги має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} S_j - P_i = 0, \quad i = \overline{1, k} \quad (7)$$

де  $P_i$  – компоненти зовнішніх сил у вузлових точках;  $a_{ij}$  – напрямні косинуси кутів між напрямком стрижня й відповідною віссю координат:

$$a_{ij}^x = \frac{x_j - x_i}{l_j}; \quad a_{ij}^y = \frac{y_j - y_i}{l_j}; \quad a_{ij}^z = \frac{z_j - z_i}{l_j}. \quad (8)$$

Якщо індекс  $j$  відповідає стрижню, не пов'язаному з вузлом, що відповідає даному рівнянню, то  $a_{ij} = 0$ .

Отже, математична модель завдання буде мати такий вигляд:

$$M = \frac{\rho}{[\sigma]} \sum_{j=1}^n |S_j| \cdot l_j \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} S_j - P_i = 0, \quad i = \overline{1, k}.$$

Отже, у результаті вирішення завдання (9) можна визначити конструкцію з мінімальною силовою вагою й оптимальною КСС.

Уперше запропонований метод оптимізації конструктивно-технологічних параметрів виробів із ПКМ методом виявлення технологічних дефектів (ТД) на ранніх стадіях виробництва виробів.

Різноманітність проміжних операцій ТП може породжувати ряд технологічних дефектів. Це призводить до розкиду фізико-механічних властивостей, ускладненню розрахунків на міцність і проектувальних розрахунків, а також до необхідності збільшення коефіцієнта запасу міцності, і як наслідок - до збільшення ваги конструкції. Перераховані фактори приводять до зниження вагової ефективності композитних конструкцій, нівелюючи одну з основних переваг виробів із ПКМ.

Для визначення й усунення таких дефектів для підвищення ефективності композитних конструкцій проведений пошук, класифікація й аналіз технологічних дефектів виробів із ПКМ.

Визначено, що основними видами дефектів є: відхилення об'ємного вмісту сполучних у препрегах, відхилення в структурі армування, порушення суцільності, перепали й викривлення виробів (рисунок 13).

У наслідок цього розроблений нижчеперелічений ряд рекомендацій з попередження дефектів, що дозволило з достатньою для практики точністю виявляти й систематизувати засоби й можливості для їх нейтралізації або зниження їхнього рівня у виробництві:

- у випадку використання багатокомпонентних сполучних контролювати в'язкість сполучного, його рецептуру, температуру й вологість виробничого приміщення, умови зберігання компонентів;

- проводити своєчасну перевірку приладів і встаткування для просочення;

- проводити експрес-контроль препрега в ході просочення для визначення відповідності параметрів препрега заданим вимогам;

- при можливості використовувати готові препреги сертифікованого виробника, таким чином виключивши процес готування препрега із загального ТП виготовлення деталей; це дозволить використовувати препреги стабільної й високої якості й виключити ряд технологічних дефектів, що виникають на цьому етапі.

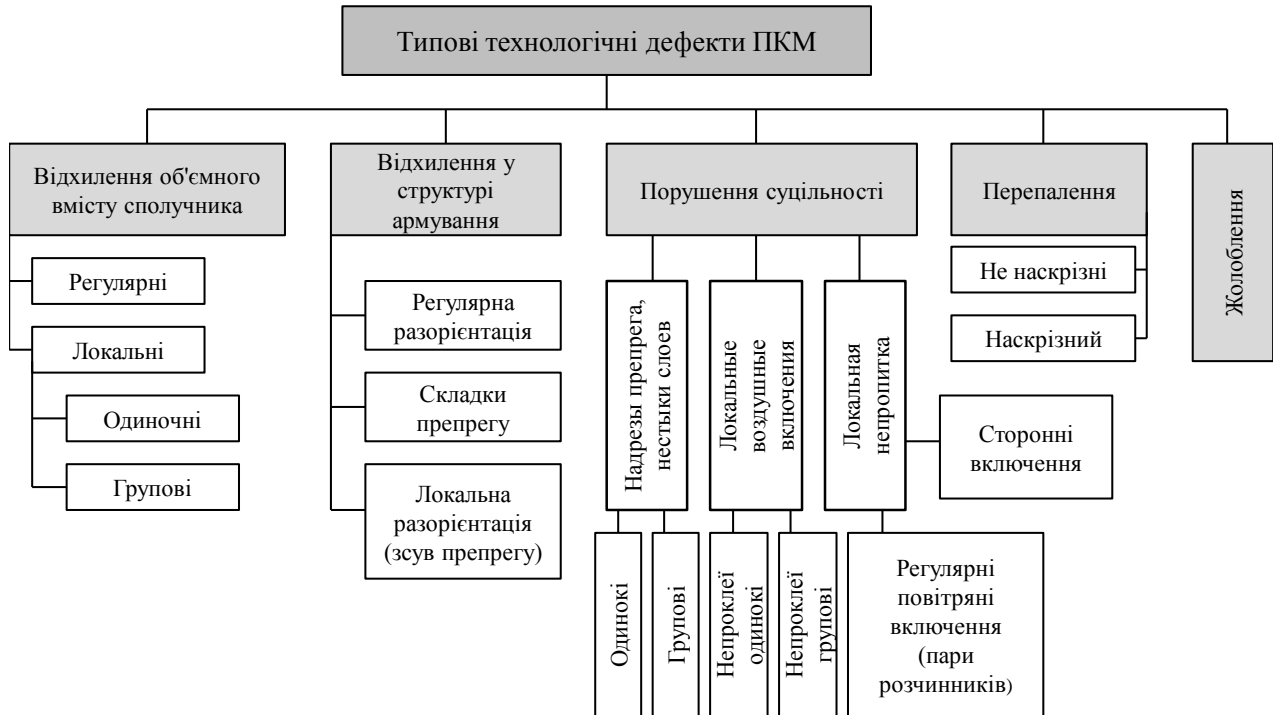


Рисунок 13 - Схема типових технологічних дефектів ПКМ

Зниження кількості дефектів, що виникають при відхиленні в структурі армування при формоутворенні виробів із ПКМ, досягається зменшенням обсягів ручної праці, використанням моделей розгорток шарів при викладенні в комплексі з лазерними проекційними системами.

Порушення суцільності веде до ослаблення комплексних характеристик міцності виробу й повинне бути чітко регламентоване й розраховане. Повною мірою це дозволяють зробити сучасні програмні комплекси пошарового моделювання (FiberSim, Composite Design), у яких на етапі створення технологічної пошарової моделі, технолог вказує зони, в яких необхідно зробити надрізи, з урахуванням характеристик армуючого наповнювача - драпірування, пружності, ступеня його деформації та ін.

Перепали деталей із ПКМ виникають у результаті неякісного процесу термічної обробки або формування деталі. Внаслідок виділення великої кількості тепла усередині деталі при її нагріванні, у зоні найбільшої товщини деталі, може спостерігатися значний короткочасний стрибок температури, що призводить до перепаду деталі в окремих її зонах. Уникнути цього можна коректуючи режими полімеризації, знижуючи рівень надлишкового тиску, збільшуючи тривалість витримки на етапі нагрівання перед виходом на основний етап режиму, а також забезпечити плавний перехід між етапами термообробки.

Описано процедури ремонту неприпустимих дефектів, що забезпечують стан і якість конструкції після ремонту, ідентичний первісній структурі деталі, таких як непроклеї й розшарування на завершальній стадії виготовлення деталей із ПКМ. Для ремонтів композитних конструкцій запропоновано застосовувати пошарове вида-



лення шарів для забезпечення доступу до зони залягання дефекту з використанням спеціального механізованого або автоматизованого обладнання (рисунок 14).

На прикладі ремонту інтегральної конструкції з вуглепластика керма висоти літака Ан-178 продемонстрована ефективність виконання ремонту із застосуванням автономного ремонтного комплексу (АРК). АРК створює вакуумне розрядження, забезпечує нагрів в зоні ремонту, а також здійснює автоматичний контроль, реєстрацію температури й рівень вакууму в зоні ремонту (рисунок 15). Це дозволило скоротити цикли й підвищити економічну ефективність ремонту, завдяки локалізації ушкодженої зони агрегату й забезпеченню необхідних параметрів ремонту (температури й тиску) без використання енергоємних автоклавів.

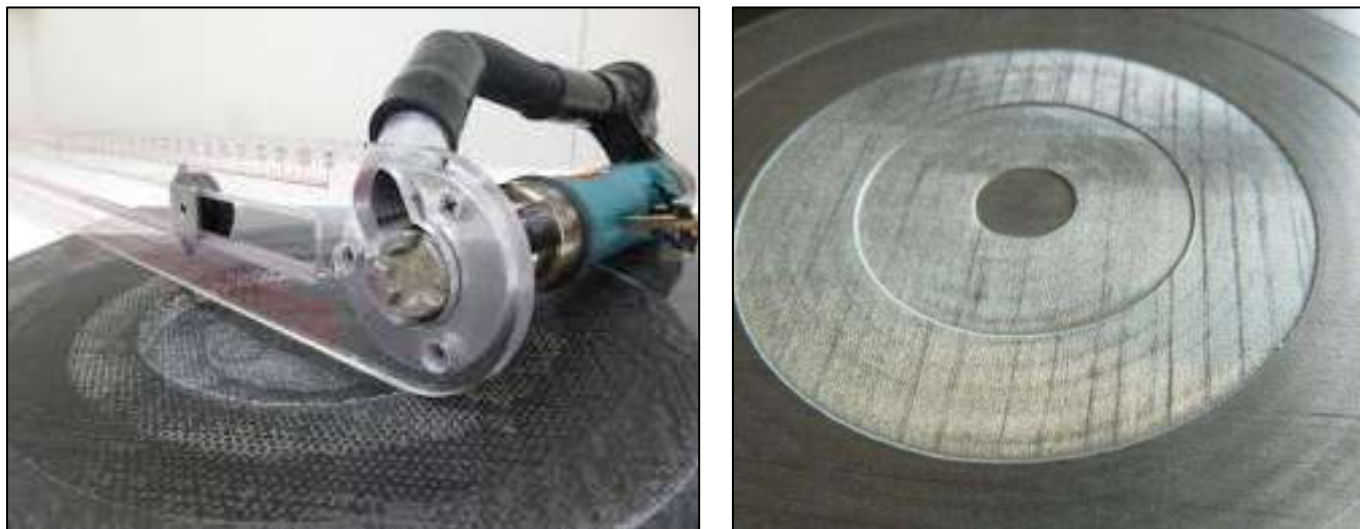


Рисунок 14 - Пошарове видалення ушкоджених шарів

У п'ятому розділі визначені основні показники технологічної собівартості виробів із ПКМ у вітчизняному авіабудуванні. Визначено, що специфіка виробництва конструкцій із ПКМ може потребувати окремого акцентування уваги на розрахунку собівартості технологічного оснащення. Її значення може вплинути на коливання загальної величини технологічної собівартості виробу в результаті вибору того або іншого КТР і матеріалу основного й допоміжного оснащення.

Запропоновано залежність для розрахунку уточненої технологічної собівартості виробів із ПКМ з докладним описом залежностей складових формули (10):

$$C_{mji} = C_{zji} + C_{oji} + C_{осн.ji} + C_{Кji} + C_{н.ц.ji} \quad (10)$$

де  $C_{zji}$  - заробітна плата з відрахуваннями до фонду соціального страхування;  $C_{oji}$  - витрати по експлуатації обладнання;  $C_{осн.ji}$  - витрати по експлуатації оснащення;  $C_{Кji}$  - витрати по використанню виробничої будівлі;  $C_{н.ц.ji}$  - інші цехові витрати.



Рисунок 15 - Ремонт ушкодженої зони керма висоти літака Ан-178  
с застосуванням АРК

Описано концепцію й обґрунтований взаємозв'язок процесів автоматизації виробничих процесів з інноваційними методами пошарового моделювання конструкцій із ПКМ на прикладі ефективного застосування лазерних проєкційних систем на ДП «АНТОНОВ». Для підтвердження концепції використана монолітна деталь крила транспортного літака з вуглепластика, що має велику кількість шарів (>100) з їх складним геометричним ув'язуванням між собою. Порівнювалися два методи - плазово-шаблонний метод ув'язування й ув'язування із застосуванням лазерних проєкційних систем.

У таблиці 2 наведені порівняльні дані по витратах для обох методів.

Таблиця 2 - Порівняльні кількісні й вартісні показники методів позиціонування шарів деталі на оснащенні

Метод	Кількість шаблонів, шт.	Вартість матеріалу для шаблонів, грн	Трудомісткість виготовлення шаблонів, н/год	Точність позиціонування, мм
Плазово - шаблонний метод	277	4000,0	1200	0,5

Продовження таблиці 2

Метод	Кількість шаблонів, шт.	Вартість матеріалу для шаблонів, грн	Трудомісткість виготовлення шаблонів, н/год	Точність позиціонування, мм
Лазерні проектори	-	-	500 (трудомісткість пошарової моделі)	0,35

Доведено, що застосування лазерних проекційних систем і модуля пошарового моделювання дозволяє значно скоротити трудомісткість і матеріалоємність підготовки виробництва для виготовлення виробів із ПКМ.

Розроблено методику розрахунку, на підставі прийнятих допущень, для зниження трудомісткості деталей і підвищення коефіцієнта використання матеріалу внаслідок впровадження комплексу «розкрійна машина + лазерні проекційні системи + система пошарового моделювання».

Виконано розрахунок строків окупності інвестицій по впровадженню комплексу залежно від програми випуску на прикладі літака Ан-178. Методика є універсальною для будь-яких типів літаків, тому що вихідними даними є величина трудомісткості виробництва композитних деталей для одного літака й маса композитних конструкцій. Критерієм економічної доцільності впровадження нового комплексу прийнята кількість літаків, випуск яких забезпечить окупність витрат.

Запропоновано розрахункову залежність по визначенню потрібної кількості лазерних проекторів і розкрійних машин залежно від програми випуску літаків (11):

$$Q_{ЛП} = \frac{T_{ЛП} \cdot K_{вик}}{q_{роб.} \cdot T_{год}} \quad (11)$$

де  $Q_{ЛП}$  – потрібна кількість лазерних проекторів;

$T_{ЛП}$  – скорочена трудомісткість укладання з використанням лазерних проекторів;

$K_{вик.}$  - коефіцієнт використання лазерних проекторів, рівний 0,7 (не всі деталі виготовляються з використанням лазерних проекторів);

$q_{роб.}$  - кількість людей, що працюють із одним проектором (прийнята рівною 4);

$T_{год}$  – річна трудомісткість одного робітника, люд.год. (становить 2004 люд.год у рік).

Кількість розкрійних машин визначається із співвідношення кількості лазерних проекторів до кількості розкрійних машин 12:1 (визначено експериментально із практичних даних).

Прийнявши допущення по скороченню трудомісткості при укладанні матеріалу на 30% при використанні лазерних проекторів одержимо скорочену трудомісткість укладання:

$$T_{ЛП} = 70\% \cdot T_{укл} \quad (12)$$

де  $T_{укл}$  – трудомісткість викладення матеріалу без лазерних проекторів.  
 $T_{укл}$  визначається наступною залежністю:

$$T_{укл} = 70\% \cdot T_B \quad (13)$$

де  $T_B$  – трудомісткість викладення без використання проекторів.

Викладення, як один з найбільш трудомістких процесів займає половину трудомісткості виготовлення деталі:

$$T_B = 50\% \cdot T_{\Sigma} \quad (14)$$

де  $T_{\Sigma}$  - загальна трудомісткість виготовлення деталі.

Економія матеріалу при використанні розкрійної машини досягається за рахунок підвищення коефіцієнту використання матеріалу (КВМ). Без використання розкрійної машини (ручний розкрій) КВМ приймається рівним 0.7, що вже є достатньо високим показником. З використанням розкрійної машини, завдяки програмі оптимального розкрою, КВМ буде дорівнювати 0,92, що забезпечує 22% економії матеріалу (таблиця 3). Вартість 1 кг вуглецевого препрега прийнята 180 USD, препрега на основі скляних волокон - 120 USD.

Таблиця 3 - Дані про економію матеріалів з використанням розкрійної машини і їхню вартість.

Кількість літаків, шт.		1	12	24
Загальна вага деталей із ПКМ на літаку Ан-178*:	вуглепластики, G, кг	1350	16 200	32 400
	склопластики, G, кг	900	10 800	21 600
Економія матеріалу, G економії матеріалу, кг	вуглепластики G, кг	297	3 564	7 128
	склопластики G, кг	198	2 376	4 752
Економія засобів, USD	вуглепластики G, кг	53 460	641 520	1 283 040
	склопластики G, кг	23 760	285 120	570 240
Сумарна економія засобів по матеріалам, USD		77 220	926 640	1 853 280

\* у розрахунках врахована вартість тільки препрегів на основі вуглецевих і скляних волокон.

Сумарна економія у вартісному еквіваленті від зниження трудомісткості при розкрої й викладенні, а також економії матеріалів наведена в таблиці 4.

Таблиця 4- Економія матеріалів і трудовитрат, отримана в результаті застосування розкрійних машин і лазерних проекторів.

Кількість літаків, шт.	1	12	24
Економія матеріалів, USD	77 220	926 640	1 853 280
Сумарна економія трудомісткості, USD*	58 013	616 321	1 178 084
Сумарна економія, USD	135 233	1 542 961	3 031 364

\* собівартість однієї години робіт працівниками становить 72 грн. = 3,5 USD, для інженерно-технічних працівників – 96 грн. = 4,7 USD (визначено відповідно до діючих нормативів).

Для визначення періоду окупності необхідно розділити сумарні витрати по впровадженню комплексу «розкрійна машина + лазерні проекційні системи + система пошарового моделювання» на економію, що одержана при виробництві кожного літака від впровадження автоматизованого обладнання й комплексу пошарового моделювання при темпах виробництва 12/24 літака в рік.

Виходячи з отриманих значень, окупність інвестицій для програми 12 літаків/рік наступить після виробництва 17-го літака, для програми 24 літака/рік - після виробництва 21-го літака (рисунок 16).

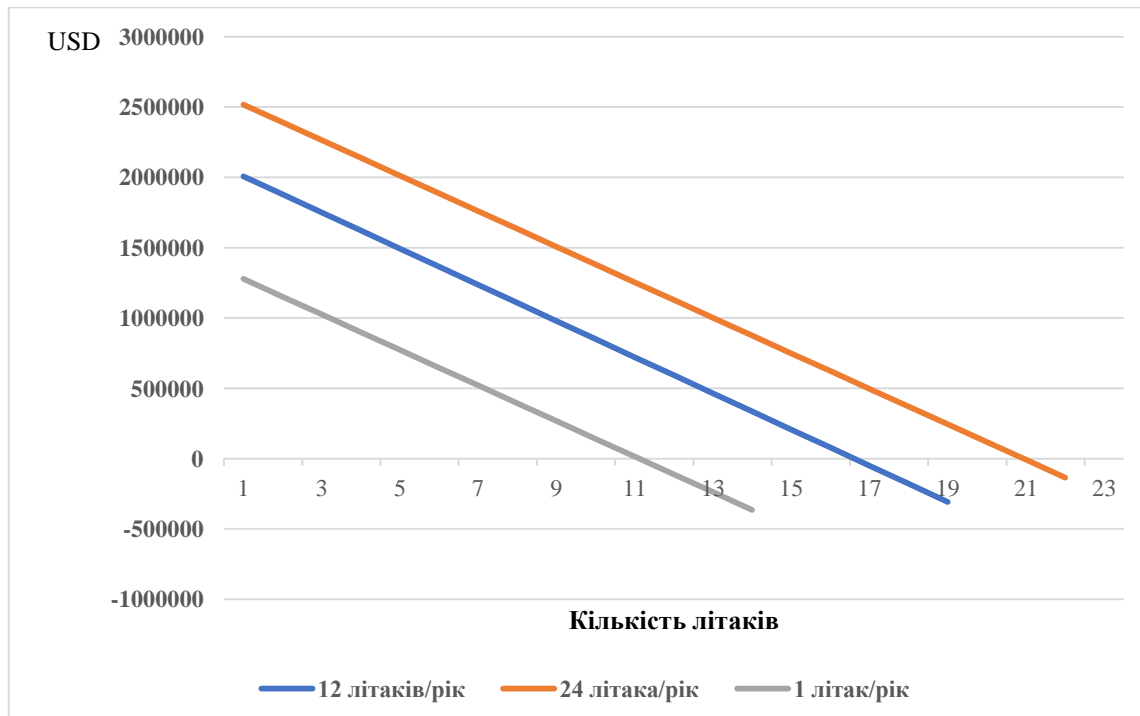


Рисунок 16 - Графік окупності встаткування в залежності від програми випуску літаків

Доказом запропонованих допущень і методик є виготовлення кінцевої аеродинамічної поверхні літака (КАП) Ан-178 у різні періоди часу.

Перша КАП була спроектована традиційними методами проектування й виготовлена без застосування розкрійної машини й лазерних проекторів для літака Ан-158 в 2008 році. Через спадковість агрегатів крила літаків Ан-158 і Ан-178 кінцева аеродинамічна поверхня не отримала конструктивних змін і була впроваджена на літак Ан-178.

В 2020 році, був розроблений комплект електронної технологічної документації для виготовлення аналогічної КАП літака Ан-178 із застосуванням сучасних імпортованих матеріалів, лазерних проекторів, розкрійної машини й пошарових електронних моделей.

У таблиці 5 наведені порівняльні дані по кількості матеріалу, трудомісткості й циклам виробництва КАП для однієї консолі крила.

Таблиця 5 - Порівняльні характеристики виготовлення КАП у різні періоди

№ п/п	Порівняльна характеристика	КАП Ан-158 (2008 рік)	КАП Ан-178 (2020 рік)
1	Кількість матеріалу, м <sup>2</sup>	86	62
2	Трудомісткість виготовлення однієї КАП, люд/год	380	252
2.1	- трудомісткість викладення, люд/год	190	126
2.1.1	- трудомісткість розкрою, люд/год	57	28
2.1.2	- трудомісткість укладання, люд/год	133	98
3	Цикл виробництва, змін	9	6

Проаналізувавши наведені дані, можна відзначити, що при виготовленні КАП для літака Ан-178 в 2020 році досягнуте зниження трудомісткості при розкрої матеріалу на 49% і отримане зниження трудомісткості при викладенні матеріалу на 26%, цикл виробництва скоротився на 3 робочі зміни. Завдяки системі оптимального розкрою була досягнута економія матеріалу на суму орієнтовно 1000 USD для лівої консолі крила. Величина КВМ при розкрої вуглецевих препрегів на розкрійній машині склала 0,92. З урахуванням цього, можна зробити висновок, що отримані дані добре співвідносяться з допущеннями, які були прийняті в розробленій методиці.

Визначено, що одним з методів підвищення ефективності й важливим напрямком подальшого розвитку потенційних можливостей композитних конструкцій є зниження виробничих витрат при реалізації економічно ефективних і продуктивних технологій безавтоклавного формування виробів із ПКМ.

Також, у розділі наведено основні особливості трансферно-інфузійних методів формування, таких як RTM, VaRTM, A-VaRTM, CAPRI, LRI, RFI і ін. Їх впровадження дозволяє ще більше знизити виробничі витрати й сприяє розширенню номенклатури авіаційних композитних конструкцій. У порівнянні із традиційними автоклавними технологіями, нові методи дозволяють істотно підвищити ефективність процесів виготовлення й складання конструкцій із ПКМ, а в ряді випадків одночасно підвищити їхню надійність і несну здатність.

## ВИСНОВКИ

Поставлена мета дисертаційної роботи досягнута в повному обсязі: вирішена проблема підвищення вагових, економічних і льотно-технічних характеристик вітчизняних літаків транспортної категорії, які забезпечують їх високу конкурентну здатність шляхом розробки наукових основ підвищення ефективності створення конструкцій із ПКМ на етапах життєвого циклу виробу.

1. Проведено огляд і аналіз світових тенденцій розвитку полімерних композиційних матеріалів у виробі авіаційної техніки, як одного зі шляхів підвищення ефективності авіаційної техніки. Описано основні етапи розвитку й застосування ПКМ у конструкціях вітчизняних і закордонних транспортних літаків. Визначено першопричини й проблеми впровадження полімерних композитів в агрегатах літаків: складність вибору оптимальних конструктивно-силових схем, значні обсяги проектувальних розрахунків і розрахунків на міцність, висока вартість сировини, необхідність застосування дорогого встаткування, забезпечення довговічності й надійності в експлуатації, вплив шкідливих речовин на організм робочого персоналу. Сформульовано мету й завдання дослідження.

2. У рамках вирішення комплексної проблеми підвищення ефективності виробництва композитних виробів для авіаційної техніки автором проведений аналіз сучасного стану технологій виробництва й сформульована загальна дворівнева класифікація технологічних процесів виробництва виробів із ПКМ, що враховує сучасні тенденції застосування нових матеріалів і технологій, які одержали активний розвиток останнім часом, такі як методи безавтоклавного формування й адитивні технології.

Уперше розроблений класифікатор етапів життєвого циклу виробів із ПКМ із ієрархічною класифікацією членування процесу створення композитних агрегатів по ряду ознак. Запропонований класифікатор містить сім груп ознак категорії життєвого циклу виробів: аналіз ефективності конструкцій із ПКМ; склад конструкцій з описом типів конструкцій і застосовуваних матеріалів; виробничу складову життєвого циклу в комплексі з описом основних типів технологічних процесів, устаткування й технологічного оснащення; випробування авіаконструкцій; експлуатації авіаконструкцій; утилізації авіаконструкцій із ПКМ. Запропонований класифікатор дозволяє визначити послідовність і обсяг робіт по забезпеченню ефективного застосування виробів із ПКМ в агрегатах авіаційної техніки.

3. Розроблено генеральну класифікаційну таблицю, що описує повний комплекс дослідницьких, технологічних, дослідно-конструкторських і виробничих робіт для створення найбільш ефективної конструкції відповідно до наявних обмежень на виробництві. Для більш точної оцінки обраного рішення по рівнях класифікаційної таблиці запропоновані часткові складові критеріїв, для оцінки обраного рішення.

4. Доведено, що якість конструкцій із ПКМ, яка визначає ресурс і довговічність деталей визначається якістю формуючого оснащення. У зв'язку із цим описані групи вимог, що пред'являються до технологічного оснащення на підставі яких розроблені рекомендації з вибору типу оснащення залежно від виробничих факторів, застосовуваних матеріалів, обсягів виробництва й необхідної якості виробів. На прикладі майстер-моделі для оснащення носка закрилка центроплана з вуглепла-

стика продемонстрована ефективність і коректність описаних критеріїв вибору матеріалу для технологічного оснащення.

5. Доведено, що рівень технологічної підготовки виробництва й вибір критеріїв проектування впливає на собівартість кінцевого виробу. За результатами розгляду конкретних прикладів деталей літака Ан-178 зроблений аналіз недоліків, які були допущені при проектуванні виробів із ПКМ, що спричинило ускладнення технологічного оснащення, збільшення циклів підготовки виробництва і як наслідок зниження рівня якості одержуваних деталей. Розроблено рекомендації з удосконалювання існуючих конструкцій, що дозволить знизити трудомісткість виготовлення деталей, підвищити якість поверхні, скоротити цикли підготовки виробництва, уніфікувати номенклатуру застосовуваних матеріалів, і таким чином підвищити рівень технологічної досконалості виробів із ПКМ для літаків «Ан».

6. Сформовано основні складові раціонального проекту створення композитних агрегатів транспортних літаків. Розроблено укрупнену блок-схему концепції реалізації раціонального проекту створення виробів із ПКМ, що включає постановку завдання на проектування, експлуатаційні, екологічні, економічні й виробничі складові.

7. Розроблено проектний комплекс по оптимізації технологічних параметрів виробів із ПКМ. На етапі проектування, комплекс враховує оптимізацію вибору конструктивно-силової схеми агрегату, вибір конструктивно-технологічного рішення, вибір застосовуваних матеріалів і ряд критеріїв ефективності в існуючих умовах виробництва. Визначено, що найбільш ефективний результат оптимізації параметрів може бути отриманий застосуванням методу синтезу КСС по раціональному розподілу конструкційного матеріалу в поєднанні з порівняльними дослідженнями параметричної оптимізації.

8. Розроблено методику для вибору раціональної конструктивно-силової схеми агрегатів із ПКМ, що реалізована шляхом вирішення завдання математичного програмування - симплекс-методом. Запропонований і описаний метод оптимізації конструктивно-технологічних параметрів конструкцій із ПКМ шляхом виявлення технологічних дефектів на ранньому етапі підготовчих операцій виробництва й при виготовленні виробів.

9. На підставі аналізу загальної технологічної собівартості виробів визначена структура собівартості процесів виготовлення деталей із ПКМ. Проведено комплексну оцінку структурних складових технологічної собівартості, результатом чого став розподіл завдання на основні й допоміжні функціональні складові. Описано залежності технологічної собівартості виробів із ПКМ, а також запропоновані залежності для визначення основних складових технологічної собівартості.

Проведений аналіз методів геометричного ув'язування шарів армуючого наповнювача конструкцій із ПКМ, що застосовувалися раніше, дозволив виділити й обґрунтувати основні переваги застосування інноваційних систем пошарового проектування виробів із ПКМ із описом необхідності їхнього впровадження й використання для підвищення вагової, ефективності міцності і економічної ефективності при розробці конструкторської й технологічної документації на деталі із ПКМ для ПС ТК.

Проведено техніко-економічне обґрунтування необхідності й ефективності



впровадження засобів автоматизації основних технологічних операцій, складових технологічного процесу виробів із ПКМ у комплексі із впровадженням сучасного модуля для пошарового моделювання виробів із ПКМ.

10. Запропоновано залежності для визначення необхідної кількості лазерних проекторів і розкрійних машин залежно від програми випуску літаків. На практичному прикладі виготовлення КАП крила з вуглепластика літаків Ан-158 і Ан-178, доведена ефективність застосування лазерних проекційних систем, розкрійної машини в комплексі з модулем пошарового моделювання. Продемонстровано гарну збіжність прийнятих умов і допущень по зниженню трудомісткості й підвищенню КВМ.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у збірниках,**

#### **що включено до переліку наукових фахових видань України**

1. Андреев, А.В. Полимерные износостойкие композиты с наполнителями из порошковых отходов механической обработки углепластиков [Текст] / Л.Р. Вишняков, В.Н. Морозова, В.П. Мороз, В.Т. Варченко, А.С. Бычков, А.В. Андреев// Технологические системы: Научно-технический журнал. – Вып. 4/2015. – Киев: 2015. – С. 44-51.

2. Андреев, А.В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Часть 1. Общая постановка задачи [Текст] / А.В. Андреев, А.С. Бычков, А.В. Кондратьев // Вестник Одесского национального морского университета – Вып. 1(47). – Одесса:2016. – С. 60-69.

3. Андреев, А.В. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Часть 2. Анализ видов, характера и частоты эксплуатационных повреждений [Текст] / А.В. Андреев, А.С. Бычков, А.В. Кондратьев // Вестник Одесского национального морского университета – Вып. 2(48). – Одесса:2016. – С. 173-180.

4. Андреев А.В. Особенности ремонта деталей из полимерных композиционных материалов при помощи автономного ремонтного оборудования / А.В. Андреев, Б.В. Лупкин, В.С. Нитка, В.С. Петропольский //Mechanics and Advanced Technologies: сб. науч. тр. Национального технического университета «КПИ». – Вып. 3 (84). – К., 2018.- С.69-74.

### **Статті у збірниках України, що включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International**

5. Oleksandr Haidachuk Classification aspects of rational utilization of polymer composite materials in the civil aircraft structures/ Oleksandr Haidachuk, Wang Bo, Serhii Bychkov, Oleksii Andrieiev// Proceedings of the National Aviation University, №3(80), 2019, pp. 36-40.

6. Oleksii Andrieiev Prospects and aspects of advanced polymeric composite materials introduction in Antonov aircraft structures / Oleksii Andrieiev// Proceedings of the National Aviation University, № 4 (81), 2019, pp. 14-18.

7. Андреев, А.В. Технологические аспекты применения пленочных связующих при создании конструкций из композиционных материалов пассажирских и транспортных самолетов [Текст] / А.В. Андреев, З.Н. Демиденко, А.В. Андреева// Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(76). – Харьков: НАКУ, 2013. – С. 21-27.

8. Андреев, А.В. Оптимизация выбора материала мастер-моделей для изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях единичного и опытного производства в изделиях авиационной техники [Текст] / А.В. Андреев, В.С. Петропольский// Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2(82). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 20-29.

9. Андреев, А.В. Влияние автоматизации технологических процессов производства деталей из полимерных композитов на качественные и экономические характеристики изделий [Текст] / А.Д. Тарасюк, А.В. Андреев, А.Ю. Артаков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(83). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 7-16.

10. Андреев, А.В. Современные конструктивно-технологические решения агрегатов авиаконструкций из полимерных композиционных материалов и их реализация на предприятии Stelia Aerospace [Текст] / А.В. Андреев, Я.О. Головченко, А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(84). – Харьков: НАКУ, 2015. – С. 95-104.

11. Андреев, О.В. Вплив механічної обробки на якість поверхонь полімерних композиційних матеріалів [Текст] / Є.В. Корбут, О.В. Андреев, І.Р. Дерек, О.В. Радько, В.Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування: Зб. наукових праць Національного авіаційного університету. – Випуск 2(61). – Київ, 2013. – С. 96-100.

12. Андреев, А.В. Анализ некоторых фундаментальных проблем создания конструкций из композитных материалов и возможных путей их решения [Текст] / А.В. Андреев, Я.С. Карпов, И.М. Тараненко, М.А. Шевцова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(88). – Харьков: НАКУ, 2016. – С. 37-50.

13. Андреев, А.В. Исследование пастообразных клеев фирмы 3М для склеивания и ремонта композитных панелей [Текст] / А.В. Андреев, В.С. Нитка // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1(89). – Харьков: НАКУ, 2017. – С. 38-51.

14. Андреев А.В. Экспериментальное исследование свойств углепластиков с добавками ВУК ADDITIVES & INSTRUMENTS / А.В. Андреев, И.А. Ковалева, С.М. Гайдукова, Т.А. Сергеева // Вопросы проектирования и производства конст-

рукций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (96).– Х., 2018. – С. 130-141.

15. Андреев А.В. Тенденции и перспективы применения полимерных композитов в европейском авиастроении / А.В. Андреев, Донец А.Д. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (98).– Х., 2019. С. 19-31.

16. Андреев А.В. Основы конструирования соединительных законцовок деталей и агрегатов из композиционных материалов / А.В. Андреев, Гаврилко В.В., Карпов Я.С., Тараненко И.М., Шевцова М.А. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (98).– Х., 2019. С. 7-22

17. Андреев, А.В. Концепция технологического обеспечения создания эффективных конструкций отечественных гражданских самолетов из полимерных композиционных материалов в современных условиях [Текст] / А.В. Андреев, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, О.В. Орлов // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(138). – Харьков: НАКУ, 2017. – С. 64-77.

18. Андреев А.В. Перспективы роста применения термопластичных композиционных материалов в мировом авиастроении / С.А. Бычков, А.В. Гайдачук, А.В. Андреев, Wang Bo // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 86.– Х., 2019. С. 61-76.

19. Андреев А.В. Развитие новых конструктивно-технологических решений крыльев самолета и ремонт композитных конструкций /С.А. Бычков, А.В. Гайдачук, А.В. Андреев, Wang Bo // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 86.– Х., 2019. С. 76-91.

### **Статті у міжнародних збірниках України, які відносяться до категорії «А»**

20. Андреев А.В. Разработка комплексного критерия рационального выбора полимерных композиционных материалов/ Гайдачук А.В., Wang Bo, Бычков С.А, Андреев А.В.// Фізико-хімічна механіка матеріалів: сб. науч. тр. Фізико-механического института им. Г.В. Карпенко НАН Украины. – Том 55, №6. – Л., 2019. С. 110-118.

### **Тези**

21. Andrieiev O. High temperature resistant binder for carbon plastics based on polyfunctional epoxies and nitriles / A. Fanleib, K. Gusakova, O. Melnik, V. Petropolskiy, O.Andrieiev, M. Kazakevich // JRC Conference and workshop reports: Materials resistant to extreme conditions for future energy systems. Kyiv, 2017. – p. 54.

22. Андреев О.В. Нове теплостійке зв'язуюче для вуглепластиків на основі кополімерів поліфункціональних епоксидів та нітрילів тетракарбонових кислот / О.М. Файнлейб, О.Г. Мельничук, І.Ю. Даниленко, О.В. Андреев, К.В. // Тези

доповідей 17 української конференції з космічних досліджень. – Одеса: 2017. – С.108.

23. Andrieiev O. Development Antonov Company at the current stage / S.Bychkov, O.Semenets, O.Andrieiev //Materials of International forum on new materials industrialization and first CEE Forum on new materials new equipment industry and talent development – Ningbo: 2017.

24. Andrieiev O. Polymer composites on Antonov: from past to the future/ O.Andrieiev //Materials of 2018 China (Ningbo) – CEE countries high level talents cooperation symposium. – Ningbo: 2018.

25. Андреев О.В. Полимерные композиты на ГП «АНТОНОВ»: история и перспективы развития / Андреев О.В., В.Г. Читак // Тезисы докладов XII международных молодежных научно-технических чтений им. А.Ф. Можайского. - Запорожье: 2019. – С.214.

26. Бычков С.А. Развитие Государственного предприятия «АНТОНОВ» в современных условиях / Бычков С.А., Андреев А.В., Нечипоренко О.Ю. // Материалы международной научно- технической конференции «Прогрессивна техніка, технологія та інженерна освіта». – Херсон:2019. – С.358-364.

27. Андреев А.В. Развитие полимерных композитов на ГП «АНТОНОВ» в современных условиях /Андреев А.В. // Материалы международной научно- технической конференции «Composite Ukraine 2020». – Киев :2020. – С.29.

### Патенти

28. Пат. 135434 UA. Спосіб виготовлення підсилюючого елемента повітряного судна з полімерної композиції, МПК (2019.01) B64C 1/00 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 01455; заяв. 14.02.2019; опубл. 25.06.2019, Бюл. №. 12 – 4 с.

29. Пат. 136176 UA. Композиція для виготовлення елемента, що підсилює деталі повітряного судна, МПК (2019.01) C08L 61/10 (2006.01) C08J 9/00 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 01456; заяв. 14.02.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. №. 15 – 4 с.

30. Пат. 136300 UA. Спосіб виготовлення підсилюючого елемента повітряного судна з полімерної композиції, МПК (2019.01) B64C 1/00 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 02319; заяв. 11.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. №. 15 – 3 с.

31. Пат. 136301 UA. Композиція для виготовлення елемента, що підсилює деталі повітряного судна, МПК (2019.01) C08L 61/10 (2006.01) C08J 9/00 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Читак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 02320; заяв. 11.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. №. 15 – 6 с.

32. Пат. 138482 UA. Спосіб виготовлення підсилюючого елемента повітряного судна з полімерної композиції, МПК (2019.01) B64C 1/00 /О.В. Андреев, С. А. Бич-

ков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 05876; заяв. 29.05.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. №. 22 – 4 с.

33. Пат. 142027 UA. Спосіб підготовки технологічної оснастки для формоутворення деталей з полімерних композиційних матеріалів, МПК (2006.01) B29C 33/38 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 10617; заяв. 28.10.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. №. 9 – 6 с.

34. Пат. 142042 UA. Спосіб виготовлення великогабаритної конструкції з полімерного композиційного матеріалу, що містить отвори під установку лючків МПК (2006.01) B29C 39/42 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Яремченко В.Г., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Чітак В.Г., Яремченко В.Г., Корольков Ю.А. – № у 2019 11119; заяв. 13.11.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. №. 9 – 6 с.

35. Пат. 143356 UA. Оснащення для формування деталі з полімерного композиційного матеріалу МПК (2020.01) B29C 43/20 /О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Гайдукова С.М., Сердюк Д.В., Корольков Ю.А.; заявник і патентовласник О.В. Андреев, С. А. Бичков, Б.В. Лупкін, Гайдукова С.М., Сердюк Д.В., Корольков Ю.А. – № у 2020 00657; заяв. 04.02.2020; опубл. 27.07.2020, Бюл. №. 14 – 5 с.

## АНОТАЦІЯ

**Андреев О.В. Наукові основи підвищення ефективності створення конструкцій транспортних літаків із полімерних композиційних матеріалів на етапах життєвого циклу виробу** – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.07.02 - проектування, виробництво та випробування літальних апаратів. – Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Дисертація присвячена комплексній науково-технічній проблемі підвищення ефективності виробництва конструкцій із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) вітчизняних літаків транспортної категорії шляхом розробки наукових основ класифікації складових життєвого циклу виробу.

Містить теоретичні і практичні результати, які включають:

- наукове обґрунтування застосування технологічних процесів виготовлення деталей із ПКМ для різних умов виробництва;
- синтез наукових основ підготовки виробництва, які гармонізовані з алгоритмом вибору технологічних процесів;
- обґрунтування необхідності впровадження високотехнологічного обладнання для зниження обсягу ручної праці і підвищення якості композитних конструкцій з визначенням періодів окупності в залежності від темпів виробництва авіаційної техніки.

Вперше розроблений класифікатор етапів життєвого циклу виробів з ПКМ з ієрархічною класифікацією членування процесу створення композитних агрегатів по ряду ознак. Запропонований класифікатор містить сім груп ознак категорії життєвого циклу виробів.

Сформовано основні складові раціонального проекту створення композитних агрегатів транспортних літаків. Розроблено блок-схему концепції реалізації раціонального проекту створення виробів із ПКМ, яка включає постановку задачі на проектування, виробничі, експлуатаційні, екологічні і економічні складові.

Проведено техніко-економічне обґрунтування необхідності та ефективності впровадження засобів автоматизації основних технологічних операцій, складових технологічного процесу виробів з ПКМ в комплексі з впровадженням сучасного модуля для пошарового моделювання виробів з ПКМ.

Ключові слова: вироби із полімерних композиційних матеріалів, ефективність, технологічний процес, оптимізація, критерій оцінки.

## АННОТАЦИЯ

**Андреев О.В. Научные основы повышения эффективности создания конструкций транспортных самолетов из полимерных композиционных материалов на этапах жизненного цикла изделия** – на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.07.02 – проектирование, производство и испытания летательных аппаратов. – Национальный авиационный университет, Киев, 2020.

Диссертация посвящена комплексной научно-технической проблеме повышения эффективности производства конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) отечественных самолетов транспортной категории путем разработки научных основ классификации составляющих жизненного цикла изделия.

Содержит теоретические и практические результаты, включающие:

- комплексный анализ, классификацию и исследования широкого спектра технологических процессов для изготовления деталей из ПКМ;

- научное обоснование применения технологических процессов изготовления деталей из ПКМ для различных условий производства;

- синтез научных основ подготовки производства, которые гармонизированы с алгоритмом выбора технологических процессов;

- синтез зависимостей для эффективного внедрения средств автоматизации основных технологических операций процесса изготовления изделий из ПКМ: раскрытия заготовок и формообразования в комплексе с современным программным обеспечением для послойного моделирования конструкций из ПКМ.

- обоснование необходимости внедрения высокотехнологичного оборудования для снижения объема ручного труда и повышения качества композитных конструкций с определением периодов окупаемости в зависимости от темпов производства авиационной техники.

Проведен обзор и анализ мировых тенденций развития и применения полимерных композиционных материалов в изделиях авиационной техники, как одного из путей повышения комплексной эффективности авиационной техники. Описаны основные этапы развития и применения ПКМ в конструкциях отечественных и зарубежных транспортных самолетов. Определены первопричины и проблемы внедрения полимерных композитов в агрегатах транспортных самолетов.

Сформулирована общая двухуровневая классификация технологических процессов производства изделий из ПКМ, учитывающая современные тенденции применения новых материалов и технологий, которые получили активное развитие в последнее время, такие как методы безавтоклавного формования и аддитивные технологии.

Впервые разработан классификатор этапов жизненного цикла изделий из ПКМ с иерархической классификацией членения процесса создания композитных агрегатов по ряду признаков. Предложенный классификатор содержит семь групп признаков категории жизненного цикла изделий: анализа эффективности конструкций из ПКМ; состава конструкций с описанием типов конструкций и применяемых материалов; производственную составляющую жизненного цикла в комплексе с описанием основных типов технологических процессов, оборудования и технологического оснащения; испытания авиаконструкций; эксплуатация авиаконструкций; утилизация авиаконструкций из ПКМ.

Доказано, что качество конструкций из ПКМ, определяющее ресурс и долговечность деталей определяется качеством формообразующего оснащения. Доказано, что уровень технологической подготовки производства и выбор критериев проектирования оказывает существенное влияние на себестоимость конечного изделия. Разработаны рекомендации по совершенствованию существующих конструкций, что позволит снизить трудоемкость изготовления деталей, повысить качество поверхности, сократить циклы подготовки производства, унифицировать номенклатуру применяемых материалов, таким образом повысить уровень технологического совершенства изделий из ПКМ для самолетов «Ан».

Сформированы основные составляющие рационального проекта создания композитных агрегатов транспортных самолетов. Разработана укрупненная блок-схема концепции реализации рационального проекта создания изделий из ПКМ, которая включает постановку задачи на проектирование, производственные, эксплуатационные, экологические и экономические составляющие.

Разработан проектный комплекс по оптимизации технологических параметров изделий из ПКМ. На этапе проектирования, комплекс учитывает оптимизацию выбора конструктивно-силовой схемы агрегата, выбор конструктивно-технологического решения, применяемых материалов и ряда критериев эффективности в существующих условиях производства.

Разработана методика по выбору рациональной конструктивно-силовой схемы агрегатов из ПКМ, которая реализована путем решения задачи математического программирования – симплекс-методом. Исходными данными для этой задачи являются внешняя геометрия агрегата, направление нагрузок и их величина.

Предложен и описан метод оптимизации конструктивно-технологических параметров конструкций из ПКМ путем выявления технологических дефектов на раннем этапе подготовительных операций производства и при изготовлении изделий.

Проведен анализ технологических дефектов изделий из ПКМ и разработаны предложения по их устранению, упреждению и ремонту.

На основании анализа общей технологической себестоимости изделий определена структура себестоимости процессов изготовления деталей из ПКМ. Произведена комплексная оценка структурных составляющих технологической себестоимо-

сти, результатом чего стало деление искомой задачи на основные и вспомогательные функциональные составляющие. Описаны зависимости технологической себестоимости изделий из ПКМ, а также предложены зависимости для определения основных составляющих технологической себестоимости.

Проведено технико-экономическое обоснование необходимости и эффективности внедрения средств автоматизации основных технологических операций, составляющих технологического процесса изделий из ПКМ в комплексе с внедрением современного модуля для послойного моделирования изделий из ПКМ.

Предложены зависимости для определения необходимого количества лазерных проекторов и раскройных машин в зависимости от программы выпуска самолетов и соответственно трудоемкости производства. Определено, что окупаемость от внедрения комплекса оборудования для программы выпуска 12 самолетов/год реализуется через 18 месяцев (после выпуска 17-го самолета), а для программы выпуска 24 самолета/год – через 11 месяцев (после выпуска 21-го самолета).

На практическом примере изготовления КАП крыла из углепластика самолетов Ан-158 и Ан-178, доказана эффективность применения лазерных проекционных систем, раскройной машины в комплексе с модулем послойного моделирования. Продемонстрирована хорошая сходимости принятых условий и допущений по снижению трудоемкости и повышению КИМ.

Ключевые слова: изделия из полимерных композиционных материалов, эффективность, технологический процесс, оптимизация, критерии оценки.

## ANNOTATION

***Andriev O.V. The scientific basis for increasing the efficiency of creating composite parts for transport aircraft at stages of the lifecycle item.*** - Qualification scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.07.02 - design, manufacture and testing of aircraft. – National Aviation University, Kyiv, 2020.

In the dissertation, a complex scientific and technical problem was solved to increase the efficiency of production of structures from polymer composite materials (PCM) of domestic aircraft of the transport category by developing the scientific basis for the classification of components of the product life cycle; synthesis of an algorithm for choosing rational technological processes for manufacturing parts from PCM using the methodology of expert estimates; analysis of the effectiveness of the stage of technological preparation of production with a description of the criteria for the rational choice of technological equipment and the determination of the impact of the stages of preparation of production on the cost of products; development of a design complex for optimizing the structural and technological parameters of PCM structures for aircraft products.

Key words: polymer composite materials parts, efficiency, technological process, optimization, evaluation criteria.



Підписано до друку \_\_.\_\_.2020 р.

Формат 60 × 84/16. Папір офсетний. Офс. друк.

Ум. друк. арк. 1,86. Наклад 100 прим. Замовлення №

---

Віддруковано: Державне підприємство «АНТОНОВ»  
1, вул. Академіка Туполева, м. Київ, 03062, Україна  
E-mail: [press@antonov.com](mailto:press@antonov.com)