

doi: 10.32620/oikit.2025.106.05

УДК 629.735: 658.51.4

І. М. Лисоченко, І. В. Бичков,
С. М. Рябіков, М. І. Бичков,
Г. С. Селезньова

Технологічна підготовка виробництва складнопрофільних вузлів та агрегатів легких літальних апаратів сільськогосподарського призначення.

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Застосування традиційних технологій виготовлення вузлів і агрегатів легких літальних апаратів значною мірою обмежене геометрією їх складнопрофільних поверхонь, що пов'язано з великим обсягом технологічної підготовки такого виробництва при відносно невеликих програмах випуску таких апаратів. Цей факт не дозволяє вносити суттєві зміни в конструкцію апарата, навіть якщо вони можуть забезпечити поліпшення його експлуатаційних характеристик, через специфіку їхньої конструкції з точки зору гнучкості виробництва та обсягів. Представлено аналіз ефективності традиційного плазово-шаблонного методу (ПШМ) при технологічній підготовці виробництва (ТПВ) складнопрофільних вузлів легких сільськогосподарських літальних апаратів (ЛА) на прикладі кінцевого обтічника крила ЛА «Бекас» Х-22. Описано технологічний процес проектування та виготовлення оснастки – матриць закінцівок крила. Виконано оцінку трудомісткості цих процесів. Наведено технологію виготовлення самих закінцівок крила з фіксацією трудомісткості. Основну увагу приділено зниженню трудомісткості та усуненню обмежень, притаманних ПШМ. Аналіз отриманих результатів вказав на обмежені можливості ПШМ при проектуванні та виготовленні складнопрофільних виробів, що виражається у значній трудомісткості підготовки виробництва та самого процесу виготовлення на універсальному обладнанні із застосуванням шаблонів в якості контрольних вимірювальних інструментів. Як альтернативний варіант запропоновано технологію тривимірного моделювання складнопрофільних агрегатів ЛА – тієї ж закінцівки крила в CAD/CAM-системі. При цьому підготовка виробництва, проектування матриць також було виконано із застосуванням цієї ж системи. Оцінено трудомісткість проектування оснастки у такому варіанті підготовки виробництва. Наявність аналітичних еталонів об'єкта виробництва та технологічної оснастки дозволила розробити управляючі програми для виготовлення формуючої оснастки на обладнанні з ЧПК. Зафіксовано трудомісткість виробничих процесів виготовлення оснастки у такому варіанті, що дозволило порівняти результати двох розглянутих підходів. Застосування аналітичних еталонів у середовищі CAD/CAM-систем дозволяє усунути характерні для ПШМ залежності від людського фактору (праці виконавця високої кваліфікації) та необхідність довгострокового зберігання об'ємної плазово-шаблонної оснастки. Такий підхід застосовний для широкого спектру складнопрофільних вузлів у авіабудуванні та суміжних галузях. Перехід на CAD/CAM-технології та ЧПК-обробку економічно доцільний для виробників легких ЛА. Він дозволяє кардинально знизити трудомісткість ТПВ, підвищити гнучкість виробництва та адаптивність до змін конструкцій.

Ключові слова: технологічна підготовка виробництва; легкий літальний апарат; плазово-шаблонний метод; аналітичний еталон; CAD/CAM; верстат з ЧПК; кінцевий обтікач; трудомісткість; оснастка.

Вступ

Потреба у легких літальних апаратах (ЛА) гостро виникла у 80-х роках минулого століття, коли були розроблені нові методи боротьби зі шкідниками сільськогосподарських культур, зокрема біологічні. Однак на той час відсутніми були ефективні засоби оперативної доставки цих засобів в умовах ведення

польових робіт. Технічні вимоги до таких ЛА визначаються жорсткими обмеженнями, пов'язаними з умовами виживання самих біологічних засобів боротьби зі шкідниками під час їх внесення на поля. Облік усіх пред'явлених умов та вимог призвів до розробки ЛА «Бекас» Х-22 [1].

При організації технологічної підготовки виробництва ЛА, як і його виробництва, особливу увагу завжди приділяють складнопрофільним вузлам та агрегатам, які часто мають помітний вплив на характеристики ЛА. Як приклад можна розглянути кінцевий обтікач крила (рис. 1)



Рис. 1. Комплект кінцевих обтікачів крила ЛА «Бекас» Х-22

Геометрична форма обтікача впливає на ефективність застосування біологічних засобів (трихограм), оскільки утворення вихорів за крилом суттєво впливає на ширину смуги обробки. Форма поверхні обтікача має «подвійну кривизну», відсутні отвори та гострі кути; у місці з'єднання з консоллю крила має аеродинамічний профіль та рівномірну товщину обшивки (1,5 мм), габаритні розміри 1375/300/170 мм. Отже, конструктивними особливостями обтікача як вузла агрегату крила є складність форми поверхні, великі розміри та мала жорсткість.

Стан питання

Технологічна підготовка виробництва ЛА «Бекас» Х-22 розпочалася у 1991 р., а його серійне виробництво стартувало у 1992 р. Внаслідок перелічених вище конструктивних особливостей розглядуваного вузла, як і багатьох інших вузлів та агрегатів легких ЛА, найпоширенішим на той час методом узгодження форм та розмірів таких виробничих об'єктів був плазово-шаблонний метод (ПШМ) [1]. Узагальнено процес створення кінцевого обтікача (закінцівки) крила представлено на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема процесу виготовлення закінцівки

Обтікач крила виготовлений із 3-шарового склопластику з пінополіуретановим наповнювачем методом вакуумного формування в матрицю. Необхідним атрибутом виробництва кінцевого обтікача крила є спеціальна оснастка-матриця, яка є матеріальним носієм форми поверхні обтікача та слугує складальним пристосуванням при виготовленні цієї конструкції. Точність виготовлення оснастки з композиційних матеріалів визначається точністю виготовлення болванки, її матеріалом та режимами термообробки.

Болванка – точний зразок кінцевого обтікача крила, що має суцільну поверхню необхідної форми та якості, але відрізняється від майбутнього виробу міцністю, високою жорсткістю та масою. Контроль точності відбувався за допомогою контрольних шаблонів заданих перерізів.

Залежно від призначення плази поділяються на теоретичні та конструктивні [3]. На теоретичних плазах у натуральну величину викреслюються координатні та конструктивні осі, контури окремих перерізів поверхонь агрегатів літака та взаємне положення цих контурів щодо координатних осей у межах встановлених допусків. Теоретичний плаз був необхідний для геометричного та конструктивного узгодження обрисів обтікача (рис. 3), слугуючи джерелом для виготовлення та контролю шаблонів, з яких переносяться розміри на об'ємну оснастку.

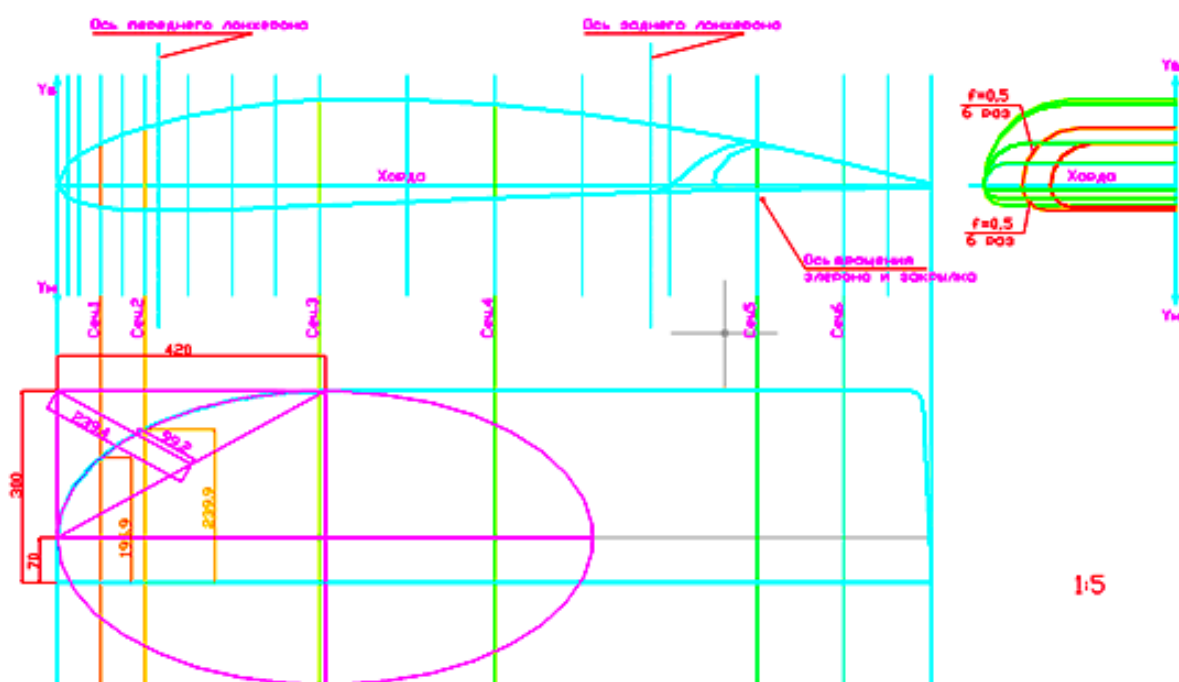


Рис. 3. Фрагмент теоретичного плаза крила ЛА «Бекас» Х-22

Конструктивні плази застосовувалися для геометричного та конструктивного узгодження всіх деталей, що входять у вузол; для отримання контуру шаблонів; для контролю шаблонів. Контури конструктивного плазу копіювалися з теоретичного, після чого за складальними кресленнями на нього наносилися деталі конструкції.

Для процесу виготовлення та контролю точності болванки потрібен комплект шаблонів, що складається з 2 планових, 2 поздовжніх та 6 поперечних шаблонів контуру перерізів (ШКП). Для виготовлення болванки необхідні

шаблони, виконані за внутрішнім контуром, а для контролю – шаблони, виконані за зовнішнім контуром. Розташування шаблонів показано на рис. 4.

Шаблони виготовляються з листового матеріалу методом прямого копіювання відповідних контурів із теоретичного плазу виробу та подальшої механічної обробки методом припилювання.

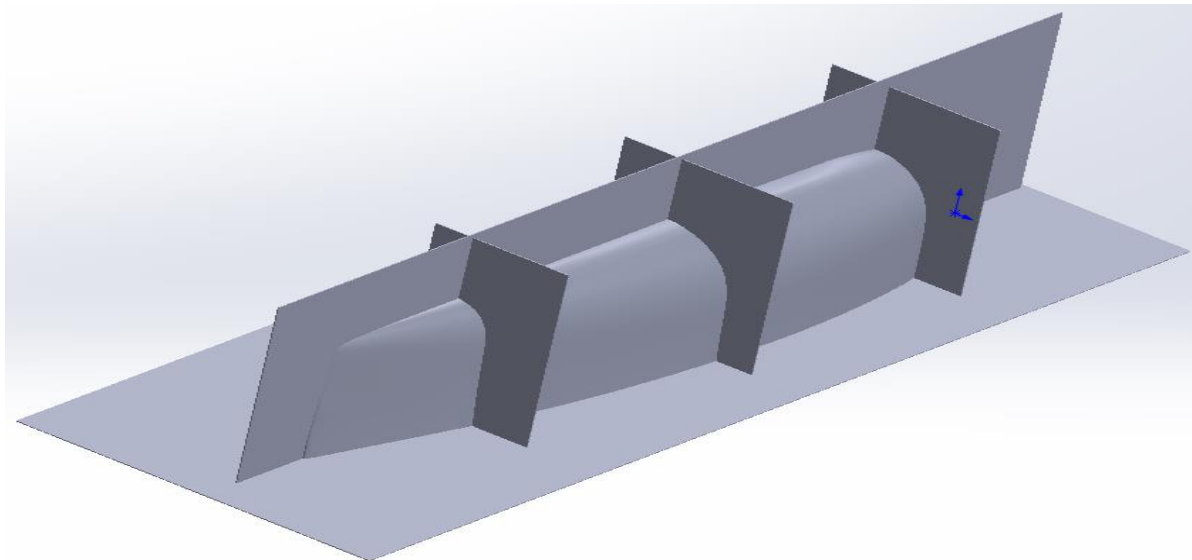


Рис. 4. Розташування шаблонів

Технологічний процес виготовлення шаблонів включає наступні типові операції: підготовка листа; розкрій заготовки; розмітка осей та контуру; вирізка за контуром; обробка за контуром; розмітка отворів; свердління отворів; нанесення інформації та маркування; контроль шаблонів; фарбування поверхонь шаблонів. Для проектувального розрахунку трудомісткості виготовлення комплекту шаблонів слід визначити сумарну довжину оброблюваних контурів комплекту шаблонів. Приблизна загальна довжина контуру 3 ШКК та 4 ШКП становить 22000 мм.

Заготовки для шаблонів виготовлялися з листової холоднокатаної сталі. Основний час підготовки листів залежить від габаритних розмірів та наявності зварного шва на стику листів. Для листа товщиною 1,5 мм та розмірами 500/1500 мм час становив 1,5 людино-годин. Розмітити обриси контуру на розкладених листах за допомогою рисальника зайняло 3 людино-годин. Після розмітки операція різки ручною ножівкою у лещатах зайняла 12 людино-годин.

Обрізані листи припилювалися та приганялися вручну за допомогою напилка до повного збігу контуру на половину ширини риски. Ця операція зайняла 23,5 людино-годин.

Для контролю зношеності нанесли контрольні лінії еквідистантно контуру на відстані 5 мм. Нанесення інформації полягало у нанесенні рисок, набиванні літер та фарбуванні шаблонів. Сумарно ці операції зайняли 8 людино-годин.

Для перевірки форм та розмірів шаблони пройшли контроль на точність нанесення положення координатних осей, точність розмітки та свердління отворів, точність опилювання за контуром, правильність взаємного узгодження, правильність нанесення інформації. Точність опилювання контуру шаблону перевіряли мікроскопом з окулярною шкалою, визначаючи величину відхилення

зовнішньої кромки плазової лінії від кромки шаблона. Сумарно ці операції зайняли 12 людино-годин.

Сумарна трудомісткість виготовлення комплекту з 10 шаблонів становив 60 людино-годин.

Після отримання комплекту шаблонів виготовлялася поверхня болванки обтікача крила. За ШКП внутрішнього контуру з фанери виготовляли деталі каркасу, який збирали за плановим ШКП. Потім каркас проклеювали склотканиною, просоченою компаундом. Трудомісткість – 8 людино-годин.

Надалі виконували процес додавання або видалення матеріалу що заповнює (у нашому випадку пінопластом) з метою максимально плавно з'єднати поверхнею болванки контурів шаблонів. Трудомісткість – 8 людино-годин.

Потім оброблений матеріал обклеювали просоченою склотканиною та полімеризували. Це необхідно для суттєвого збільшення міцності. Далі виконували остаточну обробку поверхні, що включала шпаклювання, фарбування та фінішну обробку поверхні. Цей процес зайняв 46 людино-годин.

Контроль точності полягав у визначенні прилягання контурів ШКП, виконаних за зовнішнім контуром, до робочої поверхні болванки. Величину зазору між шаблоном та болванкою вимірювали пластинчастим щупом. Допустиме відхилення не повинно перевищувати 0–0,2 мм. Точність виготовлення болванки перевіряли послідовно у всіх перерізах. Підсумкова трудомісткість виробництва болванки становила 122 людино-годин.

Матриця (рис. 5) виготовляється з композиційного матеріалу методом виклеювання на наявній болванці. Пред'явлені до неї вимоги відображають компромісні конструкторські рішення, що забезпечують необхідні довговічність та вартість при забезпеченні заданого обсягу випуску виробів. Приклад технологічного процесу виготовлення матриці показано у таблиці 1.



Рис. 5. Матриця обтікача крила

Таблиця 1

Технологічний процес виготовлення матриці.

Основні операції	Опис	Трудо- місткість, людино- годин
Операція 1	Підготовка поверхні: очищення та підготовка поверхні деталі, нанесення шару для виключення зчеплення матеріалу.	2
Операція 2	Підготовка компаунду, склотканини та добавок відповідно до вимог.	2
Операція 3	Нанесення захисного шару гелкоуту за допомогою пензля або шпателя; наступну операцію виконувати після попереднього отвердіння.	0,5
Операція 4	Контроль якості	0,5
Операція 5	Нанесення першого шару компаунду на поверхню деталі за допомогою пензля або валика.	0,25
Операція 6	Послідовне накладання та укладання шарів склотканини та просочення компаундом відповідно до схеми укладання.	4
Операція 7	Контроль якості	0,5
Операція 8	Контроль якості полімеризації	0,5
Операція 9	Після полімеризації видалення надлишків композиційного матеріалу за допомогою інструментів або обрізка для досягнення необхідних розмірів та форми деталі.	2
Операція 10	Повторення операцій 1-9 для отримання іншої половини матриці	12
Операція 11	Свердління та обробка отворів для базування та фіксації матриці відповідно до креслення.	2
Операція 12	Фінішна обробка: шліфування та обробка поверхні матриці для досягнення необхідної гладкості та обробки.	2
Операція 13	Контроль якості: перевірка деталі на відповідність необхідним специфікаціям та стандартам.	1
Операція 14	Завершальні операції: покриття захисним шаром, фарбування або інші необхідні операції.	2
Операція 15	Відділення матриці від болванки	0,5
Операція 16	Остаточний контроль якості: остаточна перевірка деталі перед її упакуванням та відвантаженням на наступний етап виробництва.	1
Всього		32,5

Під час виготовлення матриці операції виконувалися вручну з застосуванням ножиць, пензлів, шпателів. Контроль точності здійснювався послідовним прикладанням у кожному перерізі контрольних шаблонів ШКП, виконаних за внутрішнім контуром, визначенням пластинчастими щупами величини зазору та порівнянням з допустимою величиною 0–0,3 мм.

Трудомісткість виготовлення матриці становила 32,5 людино-годин.

Загальна трудомісткість виготовлення оснастки складала 158 людино-годин.

Цілі та завдання

Описаний процес технологічної підготовки виробництва з використанням ПШМ на прикладі обтікача крила є сьогодні загальноприйнятим при виготовленні легких ЛА. Звертає на себе увагу достатня універсальність методу для виготовлення виробів складної геометрії. Однак останнім часом реалізація такої технології ускладнюється високими вимогами до кваліфікації виконавців робіт та відсутністю системи їх підготовки. Залежність ж виробничого процесу від унікальних професійних можливостей працівників є одним із негативних сторін такого способу виробництва. Другою вадою застосування ПШМ у даному випадку є значна трудомісткість процесу. І якщо проаналізувати наведені вище результати, то значну частку трудомісткості виготовлення оснастки припадає на виготовлення болванки – 110 людино-годин. Крім того, її зберігання під час виробництва в особливих умовах призводить до необхідності значних матеріальних витрат. Це ж зауваження стосується і всього шаблонного господарства, яке необхідне для супроводу об'єкта виробництва протягом його життєвого циклу.

Наявність цих та деяких інших проблем призводить до необхідності пошуку альтернативних технологій виготовлення складнопрофільних об'єктів виробництва.

Методи вирішення

На всіх великих авіабудівних підприємствах з початку 90-х років минулого століття розпочалося освоєння та застосування CAD/CAM систем при виконанні технічної підготовки виробництва (конструкторської та технологічної). На сьогоднішній день у результаті виконання конструкторської підготовки виробництва формується аналітичний еталон виробничого об'єкта, який передається на серійне підприємство для виконання технологічної підготовки виробництва [4].

Наявність у CAD/CAM системі аналітичного еталону дозволяє за цією інформацією реалізувати проектування необхідної оснастки, пристосувань та виконати основні етапи технологічної підготовки виробництва за наявності на підприємстві досить широкої номенклатури станочного парку з ЧПК. Але висока вартість такого обладнання довгий час не дозволяла багатьом підприємствам мати достатньо великий парк таких верстатів за кількістю та широкий за номенклатурою для охоплення всіх основних технологічних операцій виробництва.

Ситуація на ринку обладнання з ЧПК останнім десятиліттям помітно змінилася. Значно розширилася лінійка електроприводів верстатного обладнання як за їх типорозмірами, так і принципами їх управління [4, 5, 7]. Це дозволило вивести на ринок досить широкую номенклатуру верстатного

обладнання з ЧПК за прийнятними цінами для багатьох промислових підприємств. Тому необхідно оцінити доцільність застосування такого обладнання підприємствами при випуску ними легких ЛА.

Отримані результати

Наявність аналітичних еталонів об'єкта виробництва та технологічної оснастки дозволила розробити управляючі програми для виготовлення формуючої оснастки на обладнанні з ЧПК. Зображення аналітичного еталону кінцевого обтікача крила представлено на рис. 6.

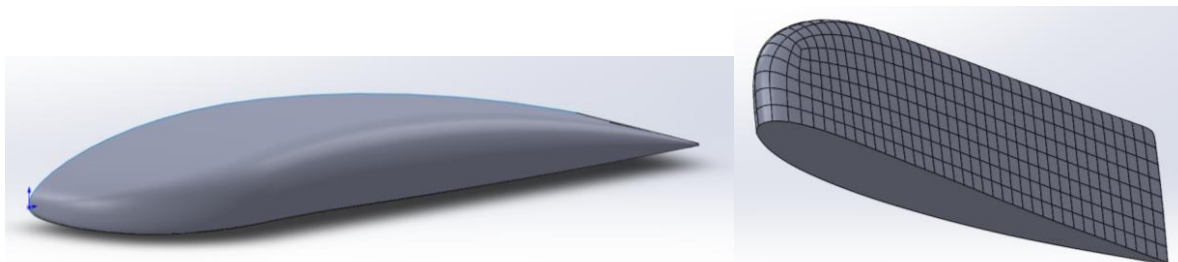


Рис. 6. Зображення АЕ геометрії кінцевого обтікача крила

Послідовність виготовлення матриці:

1. На підставі сформованого аналітичного еталону геометрії обтікача у CAD/CAM SolidWorks створено АЕ геометрії матриці (рис. 7).

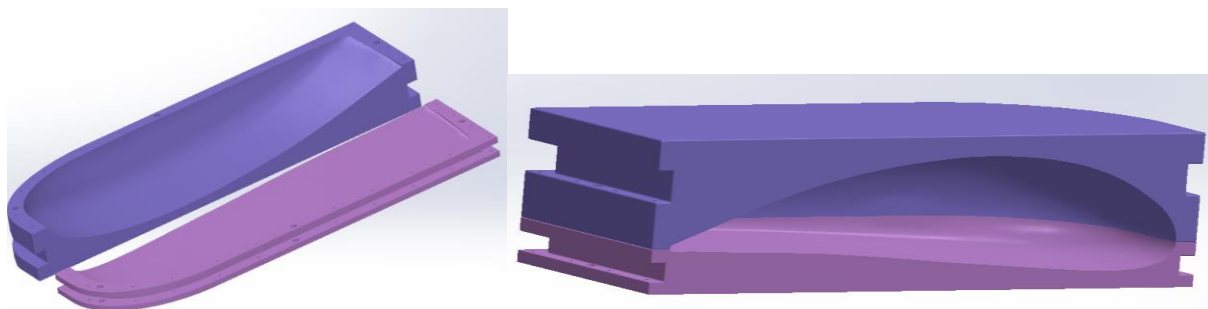


Рис. 7. Комплект АЕ геометрії матриці кінцевого обтікача крила

2. На підставі АЕ геометрії матриці та геометрії заготовки у SolidWorks формується АЕ геометрії заготовки. Матеріал заготовки – МДФ. МДФ (Medium Density Fibreboard, MDF) – це деревноволокниста плита із сухої дрібнодисперсної тирси, спресованої в суміші з карбамідними смолами під високим тиском та температурою. Матеріал однорідний за структурою, має густину від 600 до 800 кг/м³, легко піддається різці та обробці, вважається безпечним (клас Е1 – низька емісія формальдегіду). МДФ добре піддається фарбуванню, ламінації, шпонуванню та легко склеюється.

3. У додатку SolidCam створюється управляючу програму для обробки заготовки на фрезерному верстаті з ЧПК.

4. Проводиться обробка заготовки на фрезерному верстаті з ЧПК. Час, витрачений на виготовлення матриці (рис. 8), зведено у таблицю 2.

Таблиця 2

Час, витрачений на виготовлення матриці за допомогою
фрезерного верстата з ЧПК.

Операція	Інструмент	Частота обертання валу шпинделя, об/хв	Швидкість подачі, мм/хв	Подача на оборот, мм/об	Час для першої половини, год	Час для другої половини, год
Підготовка та кріплення заготовки					2	2
Формування пазу для фіксації	Т-образна фреза 60 мм	2400	2800	1,2	0,5	0,5
Попереднє розвантаження	Кінцева фреза 40мм	3500	2800	0,8	6	4,6
Чорнова обробка	Кінцева фреза 25 мм	6000	3600	0,2	2,4	2
Просочення сумішшю епоксидного клею зі спиртом	Пензель				0,25	0,25
Прогрівання при температурі 100 °С для видалення спирту та збільшення глибини просочення	Фен				2	2
Чистова обробка	Кінцева фреза 10 мм	15000	4500	0,1	2	1,5
Свердління та розточування отворів	Концев а фреза 6мм	15000	3000	0,2	2	1,5
Планування поверхні стику	Кінцева фреза 10 мм	15000	4500	0,1	0,5	0,5
Всього					17,65	15,35

Таким чином, на виготовлення комплекту матриці обтікача, що складається з двох частин (рис. 8), було витрачено 33 год.

Контроль точності виготовлення оснастки здійснюється із застосуванням лазерного сканування та полягає в отриманні портрету виготовленої оснастки, порівнянні його з АЕ оснастки та аналізом отриманих результатів.

Час вимірювання та побудови портрету з використанням вимірювальної системи верстата – 30 хвилин.



Рис. 8. Нижня частина матриці кінцевого обтікача крила

Висновки

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок щодо переваг технології, заснованої на аналітичних еталонах складнопрофільних виробничих об'єктів. Наприклад, трудомісткість виготовлення оснастки скоротилася у 4,7 рази (було 158 ч/год, стало 33 ч/год).

Слід зауважити, що на літаку встановлюється дві закінцівки, тому скорочення трудомісткості для одного літака подвоюється. Отримане зниження трудомісткості виготовлення матриці обтікача крила дозволяє досить оперативно вносити зміни до його конструкції під час серійного виробництва або на етапі експлуатації ЛА. Оскільки геометрія обтікача крила має суттєвий вплив на ширину смуги хімічної обробки сільськогосподарських угідь, з'являється можливість зміни реальних функціональних можливостей ЛА для виконання конкретних завдань.

Список літератури

1. Розробка та виробництво легких літальних апаратів сільськогосподарського призначення / С. М. Рябіков, І. В. Бичков, І. М. Лисоченко, М.І. Бичков [та ін.] // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». - 2024. - Вип. 101. - С. 70-82. doi: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.05>.
2. Алексеев Ю. С., Джур О. Є., Кулик О. В., Кучма Л. Д., Ніколенко Є. Ю.,

Хутірний В. В. Технологія виробництва ракетно-космічних літальних апаратів: навч. посібник / за ред. Є. О. Джура. – Д. : АРТ-ПРЕС, 2007. – 480 с.

3. Терещенко Ю. М., Волянська Л. Г., Животовська К. А. [та ін.] Технологія виробництва літальних апаратів: підручник: у 2 кн. – Кн. 2: Технологія складання літальних апаратів / за ред. Ю. М. Терещенка. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006. – 492 с.

4. Бичков І. В. Інформаційні та технологічні системи супроводу життєвого циклу виробів авіаційної техніки [Текст] : монографія / І. В. Бичков, К. В. Майорова, М. І. Бичков [та ін.]. - Х. : ФОП Панов А. М., 2023. - 224 с.

5. Обладнання для металообробки [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://fractalnost.com.ua/> - Назва з екрана. - Дата звернення: 26.06.2025.

6. CNC machine [Електронний ресурс]. – URL: <https://uk.stylecnc.com/> (дата звернення: 26.07.2025).

7. Groover, M.P. CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing [Текст] / M.P. Groover, E.W. Zimmers. - 3rd ed. - Upper Saddle River, NJ : Pearson Technology Group, 2008. - 618 p.

References

1. Development and Production of Light Agricultural Aircraft / S. M. Riabikov, I. V. Bychkov, I. M. Lysochenko, M. I. Bychkov [et al.] // Open Information and Computer Integrated Technologies: Collection of Scientific Papers of the National Aerospace University "KhAI". - 2024. - Vol. 101. - P. 70-82. doi: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.05>.

2. Production Technology of Rocket-Space Aircraft: Textbook / Yu. S. Alexeiev, O. Ye. Dzhur, O. V. Kulyk [et al.] ; ed. by Ye. O. Dzhur. - Dnipro : ART-PRESS, 2007. - 480 p.

3. Aircraft Production Technology: Textbook in 2 Books. Book 2: Aircraft Assembly Technology / Yu. M. Tereshchenko, L. H. Volianska, K. A. Zhyvotovska [et al.] ; ed. by Yu. M. Tereshchenko. - Kyiv : NAU Publishing House, 2006. - 492 p.

4. Information and Technological Systems for Lifecycle Support of Aviation Products [Printed Equivalent of Electronic Edition]: Monograph / I. V. Bychkov, K. V. Maiorova, M. I. Bychkov [et al.]. - Kharkiv : FOP Panov A. M., 2023. - 224 p.

5. Metalworking Equipment [Electronic resource]. - Access mode: <https://fractalnost.com.ua/> - Title from screen. - Access date: 26.06.2025.

6. CNC machine [Electronic resource]. - Access mode: <https://uk.stylecnc.com/> - Title from screen. - Access date: 26.07.2025.

7. Groover, M. P. CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing [Text] / M. P. Groover, E. W. Zimmers. - 3rd ed. - Upper Saddle River, NJ : Pearson Technology Group, 2008. - 618 p.

Надійшла до редакції 29.10.2025, розглянута на редколегії 17.11.2025

Technological preparation of production for complex-shaped components and assemblies of light agricultural aircraft.

The application of traditional manufacturing technologies for components and assemblies of light aircraft is largely limited by the geometry of their complex-shaped surfaces, which is associated with a significant volume of technological preparation for

such production, given the relatively small production volumes of such aircraft. This fact impedes the introduction of substantial changes to the aircraft's design, even if they could improve its operational characteristics, due to the specific nature of their construction in terms of production flexibility and volume. An analysis of the efficiency of the traditional loft-template method (LTM) in the technological preparation of production (TPP) for complex-shaped components of light agricultural aircraft is presented, using the example of the wingtip fairing of the "Bekas" X-22 aircraft. The technological process of designing and manufacturing the tooling – wingtip molds – is described. The labor intensity of these processes has been assessed. The technology for manufacturing the wingtips themselves is provided, with the associated labor intensity documented. The primary focus is on reducing labor intensity and eliminating the limitations inherent to the LTM. The analysis of the obtained results indicated the limited capabilities of the LTM in designing and manufacturing complex-profile products, expressed in the significant labor intensity of production preparation and the manufacturing process itself on universal equipment using templates as control measuring tools. As an alternative, a technology for 3D modeling of complex-shaped aircraft assemblies – the same wingtip – in a CAD/CAM system is proposed. Furthermore, the production preparation and mold design were also performed using this same system. The labor intensity of tooling design in this production preparation approach has been assessed. The availability of analytical digital master models of the production object and the technological tooling allowed for the development of NC programs for manufacturing the forming tooling for CNC equipment. The labor intensity of the manufacturing processes for the tooling in this approach was recorded, enabling a comparison of the results of the two considered methods. The use of analytical reference within a CAD/CAM system environment eliminates the LTM's characteristic dependence on human-intensive labor by highly skilled personnel and the necessity for long-term storage of bulky lofting-template tooling. This approach is applicable to a wide range of complex-shaped components in aerospace and related industries. The transition to CAD/CAM technologies and CNC machining is economically viable for light aircraft manufacturers. It allows for a radical reduction in the labor intensity of TPP, increases production flexibility, and enhances adaptability to design changes.

Keywords: technological preparation of production; light aircraft; loft-template method; analytical reference; CAD/CAM; CNC machine; wingtip fairing; labor intensity; tooling.

Відомості про авторів:

Лисоченко Ігор Миколайович – аспірант, кафедра технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: i.m.lysochenko@khai.edu, телефон: +380671202998, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4407-0305>.

Бичков Ігор Валерійович – д. т. н., професор, кафедра технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: i.bychkov@khai.edu, телефон: +3809395495625, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4819-5826>.

Рябіков Сергій Миколайович – аспірант, кафедра технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна

пошта: s.ryabikov1957@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9430-8354>.

телефон: +380978473306,

Бичков Микола Ігорович – к. т. н., старший викладач, кафедра технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: m.bychkov@khai.edu, телефон: +380632835380, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1776-9568>.

Селезньова Ганна Сергіївна – старший викладач, кафедра технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: a.seleznova@khai.edu, телефон: +380689644134, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-222X>.

About the authors:

Ihor Lysochenko – postgraduate student, Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: i.lysochenko@khai.edu, tel: +380671202998, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4407-0305>.

Ihor Bychkov – Doctor of Technical Science, Professor, Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: i.bychkov@khai.edu, tel: +3809395495625, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4819-5826>.

Serhiy Ryabikov – postgraduate student, Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university «Kharkiv aviation institute», Kharkiv, Ukraine. e-mail: s.ryabikov1957@gmail.com, tel: +380978473306, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9430-8354>.

Mykola Bychkov – Ph.D., Senior Lecturer, Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: m.bychkov@khai.edu, tel: +380632835380, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1776-9568>.

Hanna Seleznova – Senior Lecturer, Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university «Kharkiv aviation institute», Kharkiv, Ukraine. e-mail: a.seleznova@khai.edu, tel: +380689644134, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-222X>.