

doi: 10.32620/oikit.2026.107.03

УДК 629 73 0012

О. Г. Гребеніков, В. Є. Василевський

## Особливості технології виробництва закрилків крила літаків транспортної категорії

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»*

У даній роботі виконано аналіз і узагальнення технологічних особливостей складання закрилків літаків транспортної категорії, а також виявлення основних напрямків вдосконалення складальних процесів. Виконано аналіз конструктивних особливостей закрилків транспортних літаків, формування технологічних вимог до їх складання, розгляд типового технологічного процесу складання, а також оцінка проблем і перспектив розвитку даної галузі авіаційного виробництва. В роботі розглянуто технологія складання закрилків з урахуванням конструктивних, технологічних і організаційних факторів. Виконано аналіз конструкції та особливостей закрилків транспортної категорії. Однією з цих особливостей є висока чутливість їх аеродинамічних характеристик до відхилень геометричної форми. У зв'язку з цим до конструкції та складання закрилків висуваються жорсткі вимоги щодо точності, які регламентуються конструкторською документацією та галузевими стандартами. Забезпечення цих вимог можливе тільки при використанні продуманої схеми складання, точного оснащення та розвинутої системи контролю якості на всіх етапах технологічного процесу. Технологічні вимоги передбачають суворий контроль параметрів з'єднань: діаметра і форми отворів, зусилля установки кріплення, відсутності зазорів і дефектів. При застосуванні клейових і герметизуючих складів додатково регламентуються умови виконання операцій: температура і вологість навколишнього середовища, підготовка поверхонь, час витримки і методи контролю якості з'єднань. Технологічні вимоги до складання закрилків літаків транспортної категорії являють собою комплекс взаємопов'язаних умов і обмежень, спрямованих на забезпечення високої точності, міцності, надійності та відтворюваності конструкції. Розглянуто підготовка виробництва складання закрилків літаків транспортної категорії, яка є одним з ключових етапів життєвого циклу виробу і багато в чому визначає якість, трудомісткість і економічну ефективність подальших складальних процесів. Розглянуто систему контролю і забезпечення якості складання закрилків літаків транспортної категорії, яка являє собою багаторівневу систему, спрямовану на попередження дефектів, забезпечення високої точності і надійності конструкції. Важливим напрямком розвитку технології складання закрилків є впровадження цифрових технологій, включаючи використання тривимірних моделей, цифрових двійників і систем віртуального відпрацювання складальних процесів. **Ключові слова:** технологія; закрилок; механізація крила; контроль; конструкція; проектування.

Сучасний розвиток авіаційної техніки транспортної категорії характеризується підвищеними вимогами до ефективності, надійності та безпеки літальних апаратів. Істотну роль у забезпеченні цих вимог відіграють елементи механізації крила, зокрема закрилки, призначені для збільшення підйомної сили крила на злітно-посадкових режимах польоту. Конструктивні та технологічні рішення, що застосовуються при виготовленні та складанні закрилків, мають прямий вплив на аеродинамічні характеристики літака, його експлуатаційні параметри, ресурс та економічну ефективність [1].

Закрилки транспортних літаків відносяться до числа найбільш відповідальних агрегатів планера. Вони працюють в умовах значних аеродинамічних навантажень, циклічних деформацій і впливу зовнішнього середовища, при цьому повинні забезпечувати високу геометричну точність і стабільність форми протягом усього терміну служби. Помилки, допущені на етапі

складання, можуть призводити до погіршення аеродинамічної якості крила, збільшення опору, зростання витрати палива, а в окремих випадках – до зниження надійності та безпеки польотів [2].

В умовах серійного та дрібносерійного виробництва літаків транспортної категорії особливого значення набуває вдосконалення технології складання закрилків. На відміну від літаків малої авіації, закрилки транспортних повітряних суден характеризуються великими габаритами, складною просторовою формою і багатоелементною конструкцією. Це обумовлює високу трудомісткість складальних процесів і підвищені вимоги до організації виробництва, оснащення та кваліфікації персоналу [3].

Аналіз сучасного стану авіаційного виробництва показує, що до 40–60 % загальної трудомісткості виготовлення агрегатів механізації крила припадає саме на складальні операції [4]. При цьому складання закрилків включає в себе значну кількість відповідальних операцій: установку і базування силового каркаса, монтаж обшивки, виконання заклепкових і болтових з'єднань, забезпечення заданих зазорів і сполучень, а також контроль геометричних параметрів. Кожна з цих операцій вимагає суворого дотримання технологічних регламентів і допусків, встановлених конструкторською документацією та нормативними документами авіаційної галузі [5].

Особливістю технології складання закрилків транспортної категорії є необхідність забезпечення високої точності форми при відносно низькій жорсткості конструкції на проміжних етапах складання. Це призводить до широкого застосування спеціалізованих складальних стапелів, пристосувань і контрольних-вимірних засобів. Неправильний вибір схеми складання або недостатня точність оснащення можуть призвести до накопичення похибок, усунення яких на наступних етапах стає складним або неможливим [6].

В останні десятиліття в конструкції закрилків все ширше застосовуються нові матеріали і конструктивні рішення, включаючи високоміцні алюмінієві сплави, титанові сплави і композиційні матеріали. Це, з одного боку, дозволяє знизити масу конструкції і підвищити її ресурс, а з іншого – ускладнює технологію складання, висуваючи додаткові вимоги до умов виконання з'єднань, застосування герметиків, клейових складів і засобів неруйнівного контролю. Таким чином, технологія складання закрилків повинна постійно адаптуватися до змін в конструкції і матеріалах.

Додатковим фактором, що впливає на актуальність розглянутої теми, є посилення вимог авіаційних норм льотної придатності (АПУ-25, CS-25, FAR-25) в частині надійності систем механізації крила і точності їх функціонування [7]. Ці вимоги поширюються не тільки на розрахунок і проектування, але й на технологію виготовлення та складання, яка повинна забезпечувати стабільне відтворення заданих характеристик в умовах серійного виробництва.

В умовах цифровізації авіаційної промисловості особлива увага приділяється впровадженню сучасних технологій підготовки та супроводу складальних процесів. Використання цифрових моделей, тривимірної компоновки складання, автоматизованих систем контролю геометрії та цифрових двійників дозволяє підвищити точність і знизити трудомісткість складання закрилків [8]. Однак ефективність впровадження таких рішень багато в чому визначається якістю опрацювання базової технології складання та її адаптацією до конкретного типу повітряного судна.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених конструкції та

розрахунку елементів механізації крила, питання технології складання закрилків транспортної категорії в науковій літературі висвітлені недостатньо повно і, як правило, розглядаються фрагментарно. У більшості випадків увага приділяється окремим операціям або приватним технологічним рішенням без системного аналізу всього складального процесу [9]. Це обумовлює необхідність комплексного розгляду технології складання закрилків з урахуванням конструктивних, технологічних і організаційних факторів.

Метою даної роботи є аналіз і узагальнення технологічних особливостей складання закрилків літаків транспортної категорії, а також виявлення основних напрямків вдосконалення складальних процесів. Для досягнення поставленої мети в статті передбачається вирішення таких завдань: аналіз конструктивних особливостей закрилків транспортних літаків, формування технологічних вимог до їх складання, розгляд типового технологічного процесу складання, а також оцінка проблем і перспектив розвитку даної галузі авіаційного виробництва.

Закрилки є одним з основних елементів механізації крила літаків транспортної категорії і призначені для зміни аеродинамічних характеристик крила на злітно-посадкових режимах польоту. Їх застосування дозволяє істотно збільшити коефіцієнт підйомної сили крила при малих швидкостях, знизити злітну і посадкову дистанції, а також забезпечити необхідні характеристики керованості і стійкості повітряного судна [2].

На відміну від літаків легкої авіації, закрилки транспортних літаків працюють в умовах значно більших аеродинамічних навантажень і мають підвищені вимоги до надійності та ресурсу. Це пов'язано з великою злітною масою літака, високою інтенсивністю експлуатації та жорсткими нормами льотної придатності. Відповідно до вимог авіаційних правил АПУ-25 і CS-25, елементи механізації крила повинні забезпечувати безвідмовну роботу протягом усього встановленого ресурсу і зберігати задані характеристики при багаторазових циклах випуску і прибирання [7].

Залежно від аеродинамічної схеми і конструктивного виконання закрилки транспортних літаків поділяються на кілька основних типів: однощільні, двощільні, трищільні, а також закрилки типу Fowler. Найбільш широке поширення в сучасній транспортній авіації отримали багатощільні закрилки Fowler, що забезпечують значне збільшення площі крила і коефіцієнта підйомної сили.

Однощільні закрилки характеризуються відносною простотою конструкції і меншою масою, проте їх аеродинамічна ефективність обмежена. Дво- і трищільні закрилки дозволяють істотно поліпшити обтікання крила за рахунок формування додаткових щілин, проте відрізняються підвищеною конструктивною складністю і трудомісткістю виготовлення та складання [2].

Вибір типу закрилка визначається вимогами до злітно-посадкових характеристик літака, його призначенням, а також конструктивними і технологічними можливостями виробника. При цьому ускладнення аеродинамічної схеми неминуче призводить до ускладнення конструкції і технології складання агрегату.

Конструкція закрилків транспортної категорії, як правило, являє собою тонкостінний силовий агрегат, що включає в себе каркас, обшивку і елементи механізмів навішування. Каркас закрилка утворений поздовжніми і поперечними силовими елементами – лонжеронами і нервюрами, які сприймають основні експлуатаційні навантаження і забезпечують необхідну жорсткість конструкції [3].

Лонжерони закрилка, як правило, виконуються з алюмінієвих або алюмінієво-літєвих сплавів. Вони служать основними несучими елементами і одночасно є базовими деталями при складанні агрегату. Нервюри формують аеродинамічний профіль закрилка, передають навантаження на лонжерони і забезпечують кріплення обшивки.

Обшивка закрилка виконує як аеродинамічну, так і силову функцію, сприймаючи частину навантажень і забезпечуючи необхідну форму поверхні. У сучасних конструкціях широко застосовується робоча обшивка, що пред'являє підвищені вимоги до точності складання і якості з'єднань. Товщина і матеріал обшивки вибираються з урахуванням умов навантаження і вимог по жорсткості і масі конструкції.

Закрилки транспортних літаків взаємодіють з крилом за допомогою механізмів навішування, що складаються з системи напрямних, кареток, ланок, роликів і приводних агрегатів. Вони забезпечують задану траєкторію переміщення закрилка при випуску і прибиранні, а також передачу навантажень на кесон крила і зусиль від приводів. Конструктивна складність даних вузлів значно ускладнює як проектування, так і технологію складання закрилків.

Механізмам підвішування закрилка до крила приділяється особлива увага при проектуванні та складанні, оскільки саме в цих зонах концентруються значні навантаження. Неточності при складанні можуть призвести до перекосів, нерівномірного розподілу навантажень і підвищеного зносу елементів механізації. Тому в технологічному процесі складання передбачаються спеціальні операції з контролю взаємного положення вузлів і сполучуваних поверхонь.

У конструкції закрилків транспортної категорії традиційно застосовуються алюмінієві сплави, що мають високу питому міцність і хорошу технологічність. У найбільш навантажених вузлах використовуються титанові сплави, що відрізняються високою корозійною стійкістю і міцністю при відносно невеликій масі [6].

В останні роки спостерігається тенденція до розширення застосування композиційних матеріалів, особливо в обшивці та окремих елементах каркаса закрилків. Використання вуглепластиків дозволяє знизити масу конструкції і підвищити втмону міцність, проте висуває додаткові вимоги до технології складання, включаючи контроль умов навколишнього середовища, застосування клейових з'єднань і спеціальні методи контролю якості [10].

Однією з ключових особливостей закрилків транспортних літаків є висока чутливість їх аеродинамічних характеристик до відхилень геометричної форми. Навіть незначні похибки в куті установки, профілі або зазорах між елементами можуть призвести до погіршення обтікання крила і зниження ефективності механізації.

У зв'язку з цим до конструкції та складання закрилків висуваються жорсткі вимоги щодо точності, які регламентуються конструкторською документацією та галузевими стандартами. Забезпечення цих вимог можливе тільки при використанні продуманої схеми складання, точного оснащення та розвиненої системи контролю якості на всіх етапах технологічного процесу [11].

Таким чином, конструктивні особливості закрилків транспортних літаків безпосередньо визначають складність і специфіку технології їх складання. Багатоелементна структура, застосування різних матеріалів, високі вимоги до точності та надійності обумовлюють необхідність системного підходу до розробки та вдосконалення складальних процесів, що і визначає актуальність подальшого

розгляду технологічних аспектів.

Технологія складання закрилків літаків транспортної категорії повинна забезпечувати сувору відповідність готового агрегату вимогам конструкторської документації, авіаційних норм льотної придатності та експлуатаційних характеристик. В силу високої відповідальності даного агрегата механізації крила до складання закрилків пред'являється комплекс технологічних вимог, що охоплюють питання точності, міцності з'єднань, взаємозамінності, якості поверхні і надійності функціонування в умовах тривалого використання [1].

Особливістю складання закрилків є те, що технологічні вимоги формуються на стику аеродинаміки, міцності та технології виробництва. На відміну від багатьох інших агрегатів планера, закрилки мають безпосередній вплив на льотні характеристики літака, тому навіть незначні відхилення, допущені при складанні, можуть призвести до погіршення аеродинамічної якості крила і зниження ефективності механізації [3].

Основою для розробки технологічних вимог до складання закрилків є комплект конструкторської документації, що включає робочі креслення деталей і складальних одиниць, специфікації, технічні умови та вказівки щодо складання. Дана документація розробляється відповідно до вимог Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) і повинна забезпечувати однозначне розуміння конструкції та порядку виконання складальних операцій [2].

Поряд з конструкторською документацією при розробці технології складання враховуються вимоги нормативних документів авіаційної галузі, включаючи авіаційні правила АПУ-25 і CS-25, галузеві стандарти (ОСТ), а також державні стандарти, що регламентують типи з'єднань, допуски і методи контролю [7]. Дотримання цих вимог є обов'язковою умовою допуску виробу до експлуатації.

Технологічна документація, в свою чергу, повинна забезпечувати відтворюваність складального процесу в умовах серійного виробництва, мінімізацію впливу людського фактора і стабільну якість готових закрилків. До неї входять маршрутні та операційні карти, інструкції по складанню, контрольні карти і відомості застосовуваного оснащення [12].

Однією з ключових технологічних вимог до складання закрилків транспортної категорії є забезпечення високої геометричної точності агрегату. Це пов'язано з тим, що форма і взаємне розташування елементів закрилка безпосередньо впливають на аеродинамічні характеристики крила і коректність роботи системи механізації.

До основних параметрів, що підлягають контролю в процесі складання, відносяться: профіль закрилка, положення осі обертання або напрямних, кути установки, лінійні розміри і зазори між сполучуваними елементами. Допуски на ці параметри, як правило, складають частки міліметра і вимагають застосування високоточного оснащення і вимірювальних засобів.

Особливу складність становить забезпечення точності форми на проміжних етапах складання, коли конструкція ще не має достатньої жорсткості. У цих умовах важливу роль відіграє правильне базування деталей і вузлів у складальних пристосуваннях, а також суворе дотримання встановленої послідовності операцій [6].

Збірка закрилків включає виконання великої кількості нероз'ємних і роз'ємних з'єднань, основну частку яких складають заклепкові і болтові з'єднання. Якість виконання цих з'єднань багато в чому визначає міцність, втомну довговічність і надійність агрегату.

Технологічні вимоги передбачають суворий контроль параметрів з'єднань: діаметра і форми отворів, зусилля установки кріплення, якості розвальцювання або затягування, відсутності зазорів і дефектів. Порушення цих вимог може призвести до концентрації напружень, появи тріщин і передчасної відмови конструкції [11].

При застосуванні клейових і герметизуючих складів додатково регламентуються умови виконання операцій: температура і вологість навколишнього середовища, підготовка поверхонь, час витримки і методи контролю якості з'єднань. Ці вимоги особливо актуальні при використанні композиційних матеріалів і гібридних конструкцій.

Для літаків транспортної категорії, що експлуатуються в умовах інтенсивного використання, принципове значення має взаємозамінність агрегатів і їх елементів. Закрилки повинні встановлюватися на крило без додаткових припасувальних операцій, що можливо тільки при суворому дотриманні технологічних вимог на етапі складання.

Забезпечення взаємозамінності досягається за рахунок уніфікації баз, застосування каліброваних отворів, точного оснащення та систематичного контролю розмірів. Технологічний процес складання повинен бути спроектований таким чином, щоб виключити накопичення похибок і забезпечити стабільність геометричних параметрів від виробу до виробу [13].

Особлива увага приділяється вузлам кріплення закрилка до крила і елементам механізації, де відхилення в розмірах можуть привести до порушення кінематики випуску і прибирання закрилка, підвищених навантажень і прискореного зносу [14].

Контроль якості є невід'ємною частиною технологічних вимог до складання закрилків. Він здійснюється на всіх етапах виробничого процесу і включає вхідний контроль деталей, поопераційний контроль в процесі складання і приймальний контроль готового агрегату [15].

Для перевірки геометричних параметрів застосовуються як традиційні вимірювальні засоби (шаблони, калібри, координатні вимірювальні машини), так і сучасні методи оптичного та лазерного контролю. Крім того, широко використовуються методи неруйнівного контролю, що дозволяють виявляти приховані дефекти з'єднань і матеріалів [16].

Технологічні вимоги передбачають документування результатів контролю та простежуваність усіх операцій, що є обов'язковою умовою для сертифікованого авіаційного виробництва. Це дозволяє не тільки забезпечити якість конкретного виробу, але й аналізувати стабільність технологічного процесу в цілому.

Таким чином, технологічні вимоги до складання закрилків літаків транспортної категорії являють собою комплекс взаємопов'язаних умов і обмежень, спрямованих на забезпечення високої точності, міцності, надійності та відтворюваності конструкції. Дотримання цих вимог є необхідною умовою для забезпечення льотної придатності літака та ефективності його експлуатації, а також визначає зміст і структуру технологічного процесу складання.

Підготовка виробництва складання закрилків літаків транспортної категорії є одним з ключових етапів життєвого циклу виробу і багато в чому визначає якість, трудомісткість і економічну ефективність подальших складальних процесів. В умовах високої складності конструкції та жорстких вимог до точності та надійності закрилків даний етап вимагає системного підходу, що включає

аналіз технологічності конструкції, розробку раціональної схеми складання, проектування оснащення та організацію робочих місць.

В авіаційному виробництві підготовка складання розглядається не як допоміжний, а як рівноправний елемент процесу створення виробу, що безпосередньо впливає на забезпечення льотної придатності та відтворюваності конструкції. Помилки, допущені на етапі підготовки виробництва, як правило, призводять до зростання трудомісткості, збільшення частки браку і необхідності коригувань вже в ході серійного складання [6].

Першим етапом підготовки виробництва є аналіз технологічності конструкції закрилка. Під технологічністю розуміється сукупність властивостей конструкції, що забезпечують можливість її виготовлення та складання із заданими показниками якості при мінімальних витратах ресурсів [17]. Для закрилків транспортної категорії даний аналіз має особливе значення у зв'язку з багатоелементною структурою, складною просторовою формою та поєднанням різних матеріалів.

У процесі аналізу оцінюється раціональність поділу конструкції на складальні одиниці, доступність з'єднань для виконання складальних операцій, можливість базування деталей і вузлів, а також відповідність конструктивних рішень прийнятій технології з'єднань. При виявленні конструктивних елементів, що ускладнюють складання або контроль, формуються пропозиції щодо коригування конструкції з метою підвищення її технологічності.

Особлива увага приділяється базовим елементам закрилка – лонжеронам і вузлам кріплення до крила, оскільки саме вони визначають точність геометрії агрегату в цілому. Непродумане розташування баз або надмірна жорсткість окремих елементів може призвести до накопичення похибок і ускладнення складального процесу.

На основі аналізу конструкції розробляється схема складання закрилка, що визначає порядок формування агрегату з окремих деталей і вузлів. Для закрилків транспортних літаків найбільш поширені агрегатна і повузлова схеми складання, при яких спочатку збираються окремі вузли (каркас, елементи механізації), а потім здійснюється їх остаточне складання в єдиний агрегат.

Вибір схеми складання визначається конструктивними особливостями закрилка, обсягом виробництва та рівнем оснащення підприємства. При цьому основними критеріями є забезпечення геометричної точності, мінімізація кількості переналадок оснащення та зниження трудомісткості складальних операцій [9].

Послідовність складання розробляється таким чином, щоб найбільш відповідальні елементи встановлювалися і фіксувалися на ранніх етапах, а менш відповідальні – на заключних. Це дозволяє знизити вплив деформацій і забезпечити стабільність базування протягом усього процесу складання [3].

Складальні пристосування і стапелі є основним засобом забезпечення точності при складанні закрилків транспортної категорії. Їх проектування є одним з найбільш трудомістких і відповідальних завдань підготовки виробництва. Стапель повинен забезпечувати надійне базування деталей, фіксацію їх взаємного положення і збереження геометричної форми закрилка в процесі виконання складальних операцій [18]. Як приклад на рис. 1 представлений стапель складання закрилка літака транспортної категорії Ан-32. Стапель має безліч фіксуючих пристосувань і елементів для фіксації лонжеронів, нервюр, обшивки, кронштейнів навішування.

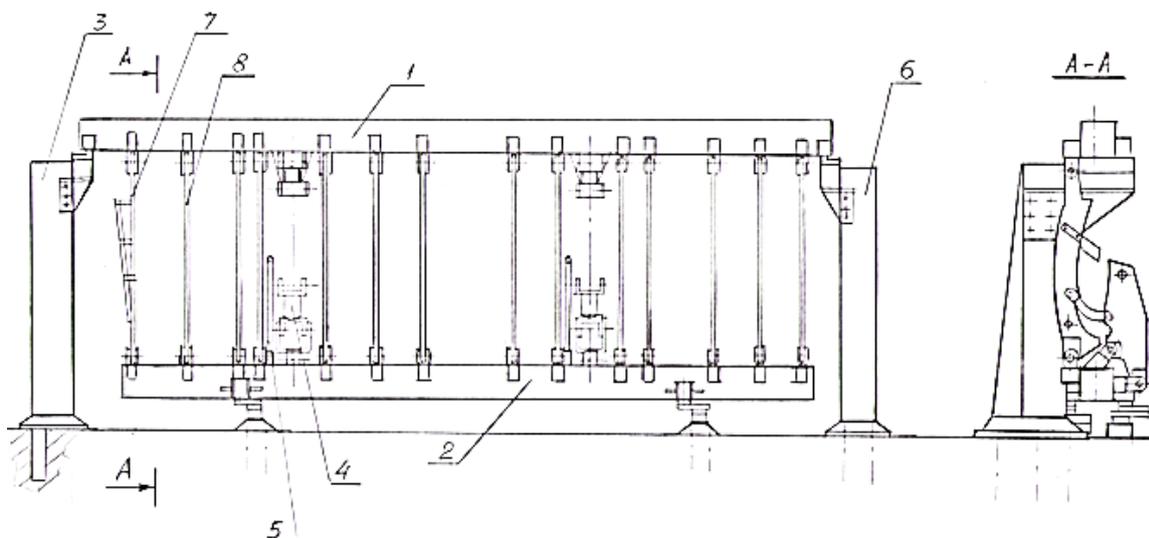


Рис. 1. Стапель складання закрилка літака транспортної категорії  
1 - балка верхня, 2 - балка нижня, 3, 6 - колони, 4 - фіксатори вузлів навіски закрилка, 5 - фіксатори нервюр кріплення під'юмників, 7 - рубільник по кореневому обрізу, 8 - рубільник по нервюрі.

При проектуванні стапельів враховуються габарити і маса закрилка, доступність зон з'єднань, можливість виконання контролю і ергономічні вимоги. У сучасних умовах все більш широке застосування знаходять універсально-переналаштовувані і модульні пристосування, що дозволяють знизити витрати при переході на нові модифікації виробу.

Точність виготовлення та складання стапельів повинна перевищувати необхідну точність готового закрилка, оскільки будь-які похибки оснащення безпосередньо передаються на виріб. У зв'язку з цим для контролю геометрії стапельів широко застосовуються координатно-вимірювальні машини та оптичні системи.

Поряд зі складальними пристосуваннями в процесі підготовки виробництва здійснюється підбір і виготовлення допоміжного оснащення, спеціального інструменту та засобів вимірювання. До них відносяться кондуктори для свердління, шаблони, калібри, а також спеціалізований клепальний і монтажний інструмент [19].

Особливе значення має забезпечення сумісності інструменту з застосовуваними матеріалами і типами з'єднань. Наприклад, при складанні елементів з композиційних матеріалів потрібні спеціальні ріжучі інструменти і системи пиловидалення, а також засоби контролю, що не пошкоджують структуру матеріалу.

Засоби контролю повинні забезпечувати перевірку всіх критичних параметрів закрилка в процесі складання і при прийманні. При цьому перевага віддається методам, що дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на стапелі без демонтажу виробу, що знижує трудомісткість і ризик пошкоджень.

Заключним етапом підготовки виробництва є організація робочих місць і складального процесу в цілому. Для складання закрилків транспортної категорії, як правило, виділяються спеціалізовані ділянки, оснащені стапелями, підйомно-транспортними засобами та засобами контролю [15].

Організація робочих місць повинна забезпечувати зручний доступ до зон

складання, безпеку виконання операцій і мінімізацію непродуктивних переміщень. При цьому враховуються вимоги охорони праці, ергономіки та технологічної дисципліни. Раціональна організація робочих місць дозволяє знизити втомлюваність персоналу і підвищити стабільність якості складання [20].

У сучасних умовах все більшого значення набуває використання цифрових технологій при підготовці виробництва, включаючи тривимірне моделювання складальних процесів, віртуальне відпрацювання операцій і електронний супровід технологічної документації. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми ще до початку фізичного складання і знижувати витрати на доопрацювання [21].

Таким чином, підготовка виробництва складання закрилків являє собою комплекс взаємопов'язаних заходів, спрямованих на забезпечення технологічності, точності та ефективності складального процесу. Якість виконання даного етапу багато в чому визначає успішність серійного виробництва закрилків і створює основу для реалізації технологічного процесу складання.

Технологічний процес складання закрилка літака транспортної категорії являє собою сукупність послідовно виконуваних операцій, спрямованих на формування закінченого агрегату з окремих деталей і вузлів із забезпеченням заданих геометричних, міцнісних і експлуатаційних характеристик. Розробка та реалізація даного процесу здійснюється на основі розглянутих вимог і є одним з найбільш відповідальних етапів авіаційного виробництва [4].

Складання закрилків відрізняється високою трудомісткістю, великою кількістю операцій і необхідністю суворого дотримання встановленої послідовності. Це обумовлено складною просторовою формою агрегату, його значними габаритами, а також поєднанням різних типів з'єднань і матеріалів. Технологічний процес складання, як правило, включає кілька етапів, кожен з яких має свої особливості та вимоги до якості виконання.

У загальному випадку технологічний процес складання закрилка транспортного літака включає наступні основні етапи: складання силового каркаса, установку елементів механізації і кріплення, монтаж обшивки, виконання остаточних з'єднань і контрольні операції. Конкретний зміст і послідовність етапів можуть варіюватися в залежності від конструкції закрилка, обсягу виробництва і прийнятої схеми складання.

Процес складання, як правило, здійснюється на спеціалізованих стапелях, що забезпечують базування і фіксацію елементів закрилка в проектному положенні. При цьому особлива увага приділяється дотриманню технологічної дисципліни, оскільки порушення послідовності операцій може призвести до деформацій конструкції і відхилень геометричних параметрів.

Збірка силового каркаса є одним з найбільш відповідальних етапів технологічного процесу, оскільки саме каркас визначає форму, жорсткість і міцність закрилка. На даному етапі здійснюється установка і фіксація основних несучих елементів – лонжеронів і нервюр – в складальному стапелі [6].

В першу чергу в стапелі базуються лонжерони, які служать основними технологічними базами. Їх положення ретельно контролюється за координатами і кутами установки. Після цього проводиться почергова установка нервюр із забезпеченням необхідного кроку і орієнтації. З'єднання елементів каркаса на даному етапі, як правило, виконується тимчасовими кріпленнями або прихваточними клепками, що дозволяє при необхідності коригувати взаємне положення деталей.

Після попереднього складання каркаса виконується поопераційний контроль геометрії, що включає перевірку лінійних розмірів, паралельності та перпендикулярності елементів. Тільки після підтвердження відповідності параметрів вимогам конструкторської документації допускається перехід до виконання постійних з'єднань [12].

Наступним етапом є установка елементів механізації та вузлів кріплення закрилка до крила. До цих елементів відносяться напрямні, каретки, ролики, кронштейни і елементи приводних механізмів. Їх монтаж вимагає високої точності, так як від взаємного розташування цих вузлів залежить коректність кінематики випуску і прибирання закрилка [2].

Встановлення елементів механізації, як правило, здійснюється з використанням спеціальних шаблонів і кондукторів, що забезпечують задане положення вузлів щодо базових елементів каркаса. На даному етапі особлива увага приділяється забезпеченню співвісності отворів, правильності посадок і відсутності перекосів.

Після установки вузлів механізації проводиться перевірка їх рухливості та відповідності проектним траєкторіям переміщення. В окремих випадках виконується імітація роботи механізму з використанням тимчасових приводів або контрольних пристосувань [14].

Монтаж обшивки є одним з найбільш трудомістких і технологічно складних етапів складання закрилка. Обшивка формує аеродинамічну поверхню агрегату і одночасно бере участь у сприйнятті експлуатаційних навантажень, що пред'являє підвищені вимоги до точності її установки і якості з'єднань.

Перед монтажем обшивки проводиться підготовка сполучуваних поверхонь, що включає очищення, знежирення і, при необхідності, нанесення захисних і герметизуючих складів. Установка листів обшивки здійснюється послідовно, з тимчасовою фіксацією і подальшим остаточним клепаанням або болтовим з'єднанням [11].

При складанні закрилків із застосуванням композиційних матеріалів додатково контролюються умови навколишнього середовища і параметри затвердіння клейових з'єднань. Будь-які відхилення від встановлених режимів можуть призвести до зниження міцності і довговічності конструкції.

Після установки всіх елементів конструкції виконуються остаточні з'єднання, включаючи повне клепаання каркаса і обшивки, затягування болтових з'єднань і нанесення герметиків в зонах, передбачених конструкторською документацією. На даному етапі тимчасові кріплення замінюються постійними, а конструкція набуває проектною жорсткості [15].

Герметизація стиків і з'єднань виконується з метою захисту конструкції від впливу вологи і агресивних середовищ, а також для запобігання корозійних пошкоджень. Якість виконання даних операцій істотно впливає на ресурс закрилка і його експлуатаційну надійність.

Контроль є невід'ємною частиною технологічного процесу складання закрилка і здійснюється як поопераційно, так і після завершення окремих етапів. Контролю підлягають геометричні параметри, якість з'єднань, стан поверхонь і відповідність застосовуваних матеріалів встановленим вимогам.

Для контролю геометрії широко застосовуються шаблони, координатно-вимірювальні машини та оптичні системи. Якість з'єднань перевіряється візуально, а також з використанням методів неруйнівного контролю. Всі результати контролю документуються в установленому порядку [22].

Таким чином, технологічний процес складання закрилка літака транспортної категорії є багатоетапним і суворо регламентованим процесом, що вимагає високої точності, технологічної дисципліни та координації всіх операцій. Ефективна організація даного процесу дозволяє забезпечити відповідність готового агрегату вимогам льотної придатності, надійності та ресурсу, а також створює передумови для підвищення ефективності серійного виробництва.

Контроль і забезпечення якості складання закрилків літаків транспортної категорії є невід'ємною частиною виробничого процесу і спрямовані на гарантовану відповідність готового агрегату вимогам конструкторської документації, авіаційних норм льотної придатності та експлуатаційної надійності. В умовах високої відповідальності елементів механізації крила контроль якості набуває системного характеру і охоплює всі стадії складання – від вхідного контролю деталей до приймання готового виробу [4, 15].

Особливістю контролю складання закрилків є необхідність одночасного забезпечення геометричної точності, міцності з'єднань і функціональної працездатності агрегату. При цьому значна частина дефектів, що виникають на ранніх етапах складання, може бути прихованою і проявлятися тільки в процесі експлуатації, що обумовлює широке застосування поопераційного і неруйнівного контролю [1].

Контроль якості складання закрилків починається з вхідного контролю деталей, вузлів і матеріалів, що надходять на складальну ділянку. Метою даного етапу є виявлення відхилень від вимог конструкторської та нормативної документації до початку складальних операцій, що дозволяє запобігти поширенню дефектів на наступних стадіях виробництва [23].

В ході вхідного контролю перевіряються геометричні розміри деталей, стан поверхонь, наявність захисних покриттів і відповідність застосовуваних матеріалів встановленим маркам. Особлива увага приділяється деталям силового каркаса і вузлам кріплення, так як дефекти в цих елементах можуть привести до зниження міцності і ресурсу закрилка.

Результати вхідного контролю документуються і служать підставою для допуску деталей до складання або для їх повернення на доопрацювання або списання. В умовах серійного виробництва вхідний контроль є важливим елементом системи забезпечення стабільної якості.

Поопераційний контроль здійснюється безпосередньо в ході виконання складальних операцій і спрямований на своєчасне виявлення відхилень від встановленого технологічного процесу. Даний вид контролю дозволяє запобігати накопиченню похибок і знижує ймовірність появи важкоусувних дефектів на заключних етапах складання [12].

У процесі складання закрилків поопераційному контролю підлягають базування деталей у стапелі, взаємне розташування елементів каркаса, параметри виконуваних з'єднань і дотримання технологічної послідовності. Контроль здійснюється як силами виробничого персоналу, так і службою технічного контролю.

Особливе значення має контроль операцій, пов'язаних з установкою елементів механізації та вузлів кріплення до крила. Порушення геометрії в цих зонах можуть призвести до порушення кінематики випуску та прибирання закрилків, підвищених навантажень і прискореного зносу механізмів.

Контроль геометрії закрилка є одним з найбільш відповідальних етапів забезпечення якості збірки. Перевірці підлягають форма аеродинамічного

профілю, лінійні розміри, кути установки, взаємне положення базових елементів і зазори між сполученими поверхнями.

Для контролю геометричних параметрів застосовуються як традиційні вимірювальні засоби (шаблони, лінійки, кутоміри), так і високоточні координатно-вимірювальні машини та оптичні системи. В останні роки все більш широкого поширення набувають лазерні та фотограмметричні методи контролю, що дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на складальному стапелі.

Результати контролю геометрії порівнюються з допусками, встановленими конструкторською документацією. При виявленні відхилень приймаються рішення про коригувальні дії, включаючи регулювання положення елементів або часткове розбирання вузла [19].

Важливим елементом системи забезпечення якості складання закрилків є методи неруйнівного контролю, що дозволяють виявляти приховані дефекти з'єднань і матеріалів без порушення цілісності конструкції. Застосування даних методів особливо актуально для відповідальних елементів каркаса і зон підвищеної концентрації напружень.

У практиці авіабудування широко застосовуються ультразвуковий, рентгенографічний, вихрострумний і капілярний методи контролю. Вибір конкретного методу визначається типом з'єднання, матеріалом деталі і характером передбачуваних дефектів.

Неруйнівний контроль використовується як в процесі складання, так і при прийманні готового закрилка. Його результати служать підставою для підтвердження відповідності конструкції вимогам міцності і надійності.

Завершальним етапом контролю якості складання є приймальний контроль, що включає комплексну перевірку готового закрилка. На даному етапі оцінюється відповідність агрегату всім вимогам конструкторської документації, технологічних регламентів і нормативних документів [7].

Приймальний контроль включає візуальний огляд, перевірку геометрії, контроль якості з'єднань і, при необхідності, функціональні випробування. Для закрилків транспортних літаків може проводитися перевірка працездатності елементів механізації, включаючи імітацію циклів випуску і прибирання.

Результати приймального контролю оформляються відповідною документацією і є підставою для передачі закрилка на наступні етапи виробництва або установки на літак. Наявність простежуваності всіх контрольних операцій є обов'язковою умовою сертифікованого авіаційного виробництва [20].

Таким чином, контроль і забезпечення якості складання закрилків літаків транспортної категорії являють собою багаторівневу систему, спрямовану на попередження дефектів, забезпечення високої точності і надійності конструкції. Ефективна організація контрольних заходів дозволяє не тільки підвищити якість готових виробів, але і забезпечити стабільність технологічного процесу в цілому, що має ключове значення для серійного авіаційного виробництва.

Складання закрилків літаків транспортної категорії належить до числа найбільш складних і трудомістких процесів авіаційного виробництва. Це обумовлено як конструктивними особливостями самих закрилків, так і підвищеними вимогами до точності, надійності та відтворюваності складальних операцій. Аналіз особливостей і проблем складання дозволяє виявити ключові фактори, що впливають на якість і ефективність виробництва, а також визначити напрямки його вдосконалення [1, 4].

На відміну від багатьох інших агрегатів планера, закрилки одночасно

виконують аеродинамічні та силові функції, працюючи в умовах змінних навантажень і частих циклів експлуатації. Це зумовлює необхідність поєднання високої геометричної точності з міцністю і довговічністю конструкції, що істотно ускладнює технологію складання [2].

Однією з характерних особливостей закрилків транспортних літаків є їх значні габарити і маса. У сучасних повітряних суднах довжина закрилка може досягати декількох метрів, а маса окремих секцій – сотень кілограмів. Це висуває підвищені вимоги до складальних стапелів, підйомно-транспортних засобів і організації робочих місць.

Великі габарити конструкції ускладнюють забезпечення рівномірної жорсткості на всіх етапах складання. При неправильному базуванні або нерівномірній фіксації в стапелі можливі деформації, які призводять до відхилень геометричної форми і вимагають додаткових коригувальних операцій [6]. Усунення таких відхилень на пізніх етапах складання, як правило, пов'язане з високою трудомісткістю і ризиком пошкодження конструкції.

Закрилки транспортної категорії відносяться до довгомірних агрегатів, для яких характерне накопичення похибок при послідовній установці елементів. Навіть незначні відхилення в положенні окремих нервюр або елементів механізації можуть підсумовуватися і призводити до помітних порушень геометрії готового виробу.

Проблема накопичення похибок особливо актуальна при складанні в умовах серійного виробництва, коли потрібно забезпечити стабільність параметрів від виробу до виробу. Для її вирішення необхідні ретельно продумані схеми базування, застосування високоточного оснащення і жорсткий поопераційний контроль [19].

Складання закрилків характеризується високою трудомісткістю, обумовленою великою кількістю операцій, значним обсягом ручних робіт і необхідністю виконання точних з'єднань. Клепальні операції, монтаж елементів механізації та контроль геометрії вимагають значних витрат часу і високої кваліфікації персоналу.

Висока частка ручної праці збільшує ймовірність помилок, пов'язаних з людським фактором, і ускладнює забезпечення стабільної якості. Крім того, трудомісткість складання має істотний вплив на собівартість виробу, що особливо важливо в умовах конкуренції на ринку цивільної авіації.

Людський фактор є одним з ключових джерел проблем при складанні закрилків транспортної категорії. Складність конструкції, різноманітність операцій і необхідність суворого дотримання технологічної дисципліни вимагають високої кваліфікації та відповідальності складального персоналу [20].

Помилки, допущені при базуванні деталей, виконанні з'єднань або контролі параметрів, можуть мати прихований характер і проявлятися лише на пізніх стадіях виробництва або в процесі експлуатації. Це обумовлює необхідність багаторівневої системи контролю і регулярного підвищення кваліфікації персоналу [15].

Розширення застосування композиційних матеріалів і гібридних конструкцій у закрилках транспортних літаків призводить до появи нових технологічних проблем. До них відносяться підвищена чутливість до умов навколишнього середовища, складність контролю якості клейових з'єднань і необхідність використання спеціалізованого обладнання.

Крім того, поєднання металевих і композиційних елементів в одній

конструкції вимагає врахування відмінностей в коефіцієнтах теплового розширення і поведінці матеріалів під навантаженням, що ускладнює як проектування, так і збірку закрилків.

До числа проблем складання закрилків транспортної категорії відносяться також організаційні фактори, такі як недостатня узгодженість між підрозділами, несвоєчасне забезпечення комплектуючими та невідповідність оснащення вимогам конкретної модифікації виробу [14].

В умовах дрібносерійного виробництва і частих змін конструкції особливо гостро проявляється проблема адаптації технологічних процесів і оснащення. Недостатня гнучкість виробництва може призводити до збільшення термінів підготовки і зростання витрат.

Таким чином, складання закрилків літаків транспортної категорії характеризується рядом специфічних особливостей і проблем, пов'язаних з великими габаритами конструкції, високими вимогами до точності, значною трудомісткістю і впливом людського фактору. З огляду на ці обставини, особливої актуальності набуває пошук і впровадження ефективних напрямків вдосконалення технології складання.

Удосконалення технології складання закрилків літаків транспортної категорії є важливим завданням сучасного авіабудування і спрямоване на підвищення якості виробів, зниження трудомісткості і собівартості виробництва, а також забезпечення стабільності характеристик в умовах серійного і дрібносерійного випуску. З огляду на виявлені особливості та проблеми складання, основними напрямками розвитку є автоматизація процесів, впровадження цифрових технологій, вдосконалення оснащення та підвищення рівня технологічності конструкції [4].

Сучасні тенденції розвитку авіаційної промисловості характеризуються переходом до інтегрованих виробничих систем, в яких технологія складання розглядається як частина єдиного цифрового контуру «проектування – виробництво – контроль». Такий підхід дозволяє підвищити ефективність складальних процесів і знизити вплив людського фактора.

Одним з найбільш перспективних напрямків вдосконалення технології складання закрилків є розширення застосування засобів автоматизації та механізації. В першу чергу це стосується операцій з високою трудомісткістю і повторюваністю, таких як свердління отворів, клепаання і установка кріплення [6].

Використання автоматизованих клепальних установок і порталних систем дозволяє підвищити точність виконання з'єднань, знизити втомлюваність персоналу і забезпечити стабільність якості. Особливо ефективно застосування таких систем при складанні довгомірних конструкцій, де потрібно витримувати суворі геометричні параметри на значній довжині виробу.

Водночас впровадження автоматизації вимагає значних початкових витрат і високого ступеня стандартизації конструкції, що необхідно враховувати при виборі раціонального рівня автоматизації для конкретного типу виробництва [20].

Важливим напрямком розвитку технології складання закрилків є впровадження цифрових технологій, включаючи використання тривимірних моделей, цифрових двійників і систем віртуального відпрацювання складальних процесів. Цифровий двійник закрилка і складального оснащення дозволяє моделювати процес складання, виявляти потенційні проблеми і оптимізувати послідовність операцій ще на етапі підготовки виробництва [21].

Застосування цифрових технологій забезпечує більш тісний зв'язок між

конструкторською і технологічною підготовкою виробництва, скорочує терміни освоєння нових виробів і знижує кількість доопрацювань в ході серійного складання. Крім того, цифрові моделі можуть використовуватися для супроводу процесу контролю і аналізу відхилень геометричних параметрів.

В умовах авіаційного виробництва цифровізація сприяє формуванню єдиного інформаційного простору, що підвищує прозорість і керованість складальних процесів [15].

Підвищення ефективності складання закрилків багато в чому пов'язане з удосконаленням складального оснащення і стапелів. Одним з перспективних напрямків є розробка універсальних і модульних стапелів, що дозволяють адаптуватися до різних модифікацій закрилків без значних витрат на переоснащення.

Використання регульованих опор, змінних базових елементів і цифрових систем позиціонування дозволяє підвищити точність базування і скоротити час переналагодження. Крім того, інтеграція засобів вимірювання безпосередньо в стапель забезпечує можливість оперативного контролю геометрії в процесі складання.

Сучасне оснащення повинно розроблятися з урахуванням ергономічних вимог і безпеки праці, що дозволяє знизити фізичне навантаження на персонал і підвищити продуктивність [24].

Істотний вплив на ефективність складання має рівень технологічності конструкції закрилків. Удосконалення конструкції з точки зору складання включає скорочення кількості деталей і з'єднань, уніфікацію елементів, раціональне розташування баз і забезпечення зручності доступу до зон складання і контролю [25].

Застосування принципів «проекування для складання» (Design for Assembly, DFA) дозволяє знизити трудомісткість складальних операцій і зменшити ймовірність помилок. Особливо актуальним є цей напрямок при розробці нових або модернізації існуючих конструкцій закрилків транспортної категорії.

Підвищення технологічності конструкції сприяє не тільки спрощенню складання, але і підвищенню надійності та ремонтпридатності агрегату в експлуатації.

Незважаючи на зростання рівня автоматизації, роль кваліфікованого персоналу в складанні закрилків залишається значною. У зв'язку з цим важливим напрямком вдосконалення технології є розвиток системи підготовки, навчання та підтримки складального персоналу [1].

Використання електронних технологічних інструкцій, систем доповненої реальності та інтерактивних навчальних програм дозволяє підвищити якість виконання операцій і знизити вплив людського фактора. Такі системи забезпечують оперативний доступ до актуальної технологічної інформації та полегшують освоєння нових процесів [26].

Підвищення кваліфікації персоналу в поєднанні з сучасними технічними засобами є необхідною умовою стабільної якості складання закрилків транспортної категорії.

Таким чином, вдосконалення технології складання закрилків літаків транспортної категорії має здійснюватися за декількома взаємопов'язаними напрямками, що включають автоматизацію, цифровізацію, розвиток оснащення, підвищення технологічності конструкції та підготовку персоналу. Комплексна реалізація даних напрямків дозволяє ефективно вирішувати виявлені проблеми

складання і забезпечує підвищення конкурентоспроможності авіаційної продукції, що визначає їх актуальність для сучасного і перспективного авіабудування.

У роботі розглянуто основні аспекти технології складання закрилків літаків транспортної категорії, що охоплюють конструктивні особливості виробів, технологічні вимоги, підготовку виробництва, послідовність складальних операцій, а також питання забезпечення якості та надійності. Проведений аналіз дозволив комплексно оцінити специфіку складання закрилків як одного з найбільш відповідальних і складних агрегатів механізації крила.

Показано, що закрилки транспортних літаків характеризуються значними габаритами, високою конструктивною складністю і суворими вимогами до геометричної точності. Ці особливості обумовлюють підвищену трудомісткість складальних процесів і необхідність застосування спеціалізованого оснащення, багаторівневого контролю та висококваліфікованого персоналу. Особливу увагу приділено впливу людського фактора і накопиченню похибок при складанні довгомірних конструкцій, що є однією з ключових проблем авіаційного виробництва.

У роботі встановлено, що ефективність і якість складання закрилків значною мірою залежать від рівня технологічної підготовки виробництва, раціонального вибору схем складання та ступеня відповідності конструкції вимогам технологічності. Неузгодженість конструкторських і технологічних рішень, а також недостатня гнучкість виробничих систем можуть призводити до збільшення термінів складання і зростання витрат.

На основі аналізу виявлених проблем визначено основні напрямки вдосконалення технології складання закрилків транспортної категорії. До них відносяться автоматизація і механізація трудомістких операцій, впровадження цифрових технологій і цифрових двійників, розвиток модульного і регульованого складального оснащення, а також підвищення технологічності конструкції на етапі проектування.

Наголошено на важливості системної підготовки та підтримки персоналу, у тому числі з використанням електронних та інтерактивних засобів навчання.

Результати дослідження мають практичну значимість і можуть бути використані при розробці та модернізації технологічних процесів збирання закрилків літаків транспортної категорії, а також під час підготовки конструкторсько-технологічної документації та організації складального виробництва. Наведені у статті підходи та висновки можуть бути основою для подальших досліджень, спрямованих на підвищення ефективності, якості та конкурентоспроможності авіаційної техніки.

### Список літератури

1. Гребеніков, О. Г., Василевський, В. Є. Аналіз методів прогнозування втомної довговічності закрилків літаків транспортної категорії / О. Г. Гребеніков, В. Є. Василевський // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : сб. науч. тр. / Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». Харків, 2025. Вип. 105. С. 5–20.
2. Кузнецов, А. С. Аэродинамика и механизация крыла самолёта. – М.: МАИ, 2017. – 312 с.
3. Григорьев, Н. П. Технология авиастроения. – М.: Высшая школа, 2016. – 384 с.
4. Schubauer, J., Henne, P. Aircraft Manufacturing Processes. – Berlin: Springer, 2020. – 529 p.

5. ГОСТ 2.103–2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – Введ. 01.06.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.
6. Смирнов, В. А. Сборочные приспособления в авиастроении. – М.: Машиностроение, 2015. – 268 с.
7. Кива, Д., Гребеников, А. Научные основы интегрированного проектирования самолетов транспортной категории : монография. Ч. 1. Харьков : ХАИ, 2014. 439 с.
8. Abramov, A., Petrov, I., Sokolov, D. Digital technologies in aircraft assembly // Aviation Technology Journal. – 2021. – Vol. 15, No. 3. – P. 45–53.
9. Иванов, Д. Ю. Анализ технологий сборки элементов механизации крыла // Вестник авиационной науки. – 2020. – № 4. – С. 32–39.
10. Campbel, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. – Oxford: Elsevier, 2018. – 616 p.
11. ГОСТ 21552–84. Соединения клёпочные авиационные. Основные требования. – Введ. 01.01.1986. – М.: Стандартинформ, 2005. – 28 с.
12. ГОСТ 3.1105–2011. Единая система технологической документации. Формы и правила оформления технологической документации. – Введ. 01.09.2012. – М.: Стандартинформ, 2012. – 36 с.
13. ГОСТ 25346–2013. Основные нормы взаимозаменяемости. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 28 с.
14. Иванов, Д. Ю. Особенности сборки элементов механизации крыла // Вестник авиационной науки. – 2020. – № 3. – С. 41–48.
15. ГОСТ ISO 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 01.11.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 32 с.
16. Hellier, Ю С. Handbook of Nondestructive Evaluation. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 864 p.
17. ГОСТ 14.205–83. Технологичность конструкции изделий. Основные положения. – Введ. 01.07.1984. – М.: Стандартинформ, 2003. – 16 с.
18. ГОСТ 3.1103–2011. Единая система технологической документации. Основные положения. – Введ. 01.09.2012. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
19. ГОСТ 26433.0–85. Обеспечение точности в машиностроении. Основные положения. – Введ. 01.07.1986. – М.: Стандартинформ, 2004. – 20 с.
20. Зайцев, А. Л. Организация сборочного производства в авиастроении. – М.: МАИ, 2014. – 296 с.
21. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 864 p.
22. ГОСТ 14771–76. Соединения болтовые. Основные требования. – Введ. 01.01.1978. – М.: Стандартинформ, 2002. – 18 с.
23. ГОСТ 24297–2013. Входной контроль продукции. Основные положения. – Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
24. ГОСТ 12.2.003–91. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – Введ. 01.01.1993. – М.: Стандартинформ, 2002. – 32 с.
25. ГОСТ 14.205–83. Технологичность конструкции изделий. Основные положения. – Введ. 01.07.1984. – М.: Стандартинформ, 2003. – 16 с.
26. Ivanov, S., Kuznetsov A., Smirnov V. Augmented reality in aircraft assembly // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 51. – P. 1173–1180.

## References

1. Grebenikov, O. G., Vasilevskij, V. Ye. Analiz metodiv prognozuvannya

vtomnoyi dovgovichnosti zakriukiv litakiv transportnoyi kategorii / O. G. Grebenikov, V. Ye. Vasilevskij // Vidkriti informacijni ta komp'yuterni integrovani tehnologiyi : sb. nauch. tr. / Nac. aerokosm. un-t «HAI». Harkiv, 2025. Vip. 105. C. 5–20.

2. Kuznecov, A. S. Aerodinamika i mehanizaciya kryla samolyota. – M.: MAI, 2017. – 312 s.

3. Grigorev, N. P. Tehnologiya aviastroeniya. – M.: Vysshaya shkola, 2016. – 384 s.

4. Schubauer, J., Henne, P. Aircraft Manufacturing Processes. – Berlin: Springer, 2020. – 529 p.

5. GOST 2.103–2013. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. Stadii razrabotki. – Vved. 01.06.2014. – M.: Standartinform, 2014. – 14 s.

6. Smirnov, V. A. Sborochnye prispobleniya v aviastroenii. – M.: Mashinostroenie, 2015. – 268 s.

7. Kiva, D., Grebenikov, A. Nauchnye osnovy integrirovannogo proektirovaniya samoletov transportnoj kategorii : monografiya. Ch. 1. Harkov : HAI, 2014. 439 s.

8. Abramov, A., Petrov, I., Sokolov, D. Digital technologies in aircraft assembly // Aviation Technology Journal. – 2021. – Vol. 15, No. 3. – P. 45–53.

9. Ivanov, D. Yu. Analiz tehnologij sborki elementov mehanizacii kryla // Vestnik aviacionnoj nauki. – 2020. – № 4. – S. 32–39.

10. Campbel, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. – Oxford: Elsevier, 2018. – 616 p.

11. GOST 21552–84. Soedineniya klyopochnye aviacionnye. Osnovnye trebovaniya. – Vved. 01.01.1986. – M.: Standartinform, 2005. – 28 s.

12. GOST 3.1105–2011. Edinaya sistema tehnologicheskoy dokumentacii. Formy i pravila oformleniya tehnologicheskoy dokumentacii. – Vved. 01.09.2012. – M.: Standartinform, 2012. – 36 s.

13. GOST 25346–2013. Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. – Vved. 01.01.2015. – M.: Standartinform, 2015. – 28 s.

14. Ivanov, D. Yu. Osobennosti sborki elementov mehanizacii kryla // Vestnik aviacionnoj nauki. – 2020. – № 3. – S. 41–48.

15. GOST ISO 9001–2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya. – Vved. 01.11.2015. – M.: Standartinform, 2016. – 32 s.

16. Hellier, Yu C. Handbook of Nondestructive Evaluation. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 864 p.

17. GOST 14.205–83. Tehnologichnost konstrukcii izdelij. Osnovnye polozheniya. – Vved. 01.07.1984. – M.: Standartinform, 2003. – 16 s.

18. GOST 3.1103–2011. Edinaya sistema tehnologicheskoy dokumentacii. Osnovnye polozheniya. – Vved. 01.09.2012. – M.: Standartinform, 2012. – 24 s.

19. GOST 26433.0–85. Obespechenie tochnosti v mashinostroenii. Osnovnye polozheniya. – Vved. 01.07.1986. – M.: Standartinform, 2004. – 20 s.

20. Zajcev, A. L. Organizaciya sborochnogo proizvodstva v aviastroenii. – M.: MAI, 2014. – 296 s.

21. Hellier, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2019. – 864 p.

22. GOST 14771–76. Soedineniya boltovye. Osnovnye trebovaniya. – Vved. 01.01.1978. – M.: Standartinform, 2002. – 18 s.

23. GOST 24297–2013. Vhodnoj kontrol produkcii. Osnovnye polozheniya. – Vved. 01.07.2014. – M.: Standartinform, 2014. – 20 s.

24. GOST 12.2.003–91. Oborudovanie proizvodstvennoe. Obshie trebovaniya bezopasnosti. – Vved. 01.01.1993. – M.: Standartinform, 2002. – 32 s.

25. GOST 14.205–83. Tehnologichnost konstrukcii izdelij. Osnovnye polozheniya. – Vved. 01.07.1984. – M.: Standartinform, 2003. – 16 s.

26. Ivanov, S., Kuznetsov A., Smirnov V. Augmented reality in aircraft assembly // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 51. – P. 1173–1180.

Надійшла до редакції 06.02.2026, розглянута на редколегії 10.02.2026

## **Features of the technology for producing wing flaps for transport category aircraft**

This work analyses and summarises the technological features of assembling flaps on transport aircraft, as well as identifying the main areas for improvement in assembly processes. An analysis of the design features of transport aircraft flaps, the formation of technological requirements for their assembly, a review of a typical technological assembly process, and an assessment of the problems and prospects for the development of this branch of aviation production are carried out. Strict requirements for accuracy are imposed on the design and assembly of flaps, which are regulated by design documentation and industry standards. These requirements can only be met by using a well-thought-out assembly scheme, precise equipment and a developed quality control system at all stages of the technological process. The paper considers the technology of flap assembly, taking into account design, technological and organisational factors. An analysis of the design and features of transport category flaps has been carried out. One of these features is the high sensitivity of their aerodynamic characteristics to deviations in geometric shape. In this regard, strict requirements for accuracy are imposed on the design and assembly of flaps, which are regulated by design documentation and industry standards. These requirements can only be met by using a well-thought-out assembly scheme, precise equipment and a developed quality control system at all stages of the technological process. Technological requirements provide for strict control of connection parameters: diameter and shape of holes, fastening installation force, absence of gaps and defects. When using adhesives and sealants, the conditions for performing operations are additionally regulated: ambient temperature and humidity, surface preparation, holding time and methods of quality control of joints. The technological requirements for the assembly of transport category aircraft flaps are a set of interrelated conditions and restrictions aimed at ensuring high precision, strength, reliability and reproducibility of the design. The article discusses the preparation for the production of transport category aircraft flaps, which is one of the key stages in the product life cycle and largely determines the quality, labour intensity and economic efficiency of subsequent assembly processes. The system for controlling and ensuring the quality of the assembly of transport category aircraft flaps is considered, which is a multi-level system aimed at preventing defects and ensuring high precision and reliability of the structure. An important direction in the development of flap assembly technology is the introduction of digital technologies, including the use of three-dimensional models, digital twins and virtual assembly process testing systems.

**Keywords:** technology; flap; wing mechanization; control; design; design.

### **Відомості про авторів**

**Гребеніков Олександр Григорович**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри конструкції літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків, Україна, [agrebenikov@ukr.net](mailto:agrebenikov@ukr.net). ORCID: 0000-0002-1509-0665.

**Василевський Віталій Євгенович**, аспірант, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків, Україна, [vitvas7309@gmail.com](mailto:vitvas7309@gmail.com). ORCID: 0009-0004-0200-887.

### **About the authors:**

**Oleksandr GREBENIKOV** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aircraft and Helicopter Design, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine, [agrebenikov@ukr.net](mailto:agrebenikov@ukr.net). ORCID: 0000-0002-1509-0665.

**Vitaliy VASILEVSKYI** – PhD student, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine, [vitvas7309@gmail.com](mailto:vitvas7309@gmail.com). ORCID: 0009-0004-0200-887.