

УДК 629.7.023:621.777:669.715

doi: 10.32620/aktt.2026.4.07

Р. С. БОРИС

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОФІЛІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Предметом вивчення в статті є технологічний процес виготовлення пресованих профілів з алюмінієвих сплавів, що використовуються як елементи авіаційних конструкцій. Метою є узагальнення технологічних особливостей виготовлення таких профілів і визначення основних чинників, що впливають на їх геометричну точність, якість поверхні, структурну однорідність і експлуатаційні властивості. **Завдання:** проаналізувати основні етапи технологічного маршруту виготовлення профілів; визначити вплив температури заготовки, швидкості пресування, ступеня деформації, геометрії інструменту, умов тертя та режимів термічної обробки; систематизувати типові дефекти профілів і можливі технологічні причини їх виникнення; сформулювати узагальнену систему технологічного забезпечення якості профілів авіаційного призначення. **Методи** дослідження: аналітичне узагальнення даних науково-технічної літератури, порівняльний аналіз технологічних чинників, систематизація причинно-наслідкових зв'язків між параметрами процесу та якістю профілю. Отримано такі **результати**. Показано, що якість пресованого профілю формується не окремою операцією, а сукупною дією всіх етапів виробничого маршруту – від підготовки та гомогенізації заготовки до пресування, охолодження, правлення, старіння та контролю готового виробу. Встановлено, що найбільш критичними для авіаційних профілів є стабільність температурно-швидкісного режиму, раціональна геометрія матриці, контроль поверхневого стану інструменту, рівномірність охолодження та узгоджені режими термічної обробки. **Наукова новизна** полягає в систематизації технологічних чинників виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів з позиції вимог авіаційного виробництва та поданні узагальненої схеми забезпечення їх якості. **Висновки.** Запропонований підхід дозволяє розглядати профіль як відповідальний напівфабрикат, властивості якого формуються на всіх стадіях технологічного процесу, й може бути використаний під час розроблення маршрутів виготовлення профільних елементів авіаційних конструкцій. **Ключові слова:** алюмінієві сплави; авіаційні конструкції; пресування профілів; технологічний процес; термічна обробка; якість поверхні; геометрична точність; технологічність.

1. Вступ

1.1. Мотивація

Профільні елементи з алюмінієвих сплавів широко застосовуються в конструкціях літальних апаратів завдяки поєднанню малої густини, достатньої міцності, технологічності та можливості отримання тонкостінних деталей складної форми. У конструкціях планера пресовані профілі можуть використовуватися як стрингери, підкріплювальні елементи панелей, елементи каркаса, напрямні, кронштейни, стикувальні та допоміжні деталі. Їх застосування дозволяє зменшувати масу конструкції, підвищувати її жорсткість і скорочувати кількість окремих складальних операцій [1, 2].

Для авіаційної техніки особливе значення має не лише вибір марки алюмінієвого сплаву, а й забезпечення стабільності всього технологічного процесу виготовлення профілю. Навіть за наявності високоякісного матеріалу порушення режимів нагрівання, пресування, охолодження або термічної обробки

може призвести до зниження механічних властивостей, появи залишкових напружень, викривлення профілю, погіршення якості поверхні або нестабільності геометричних параметрів.

Особливо складним є виготовлення тонкостінних профілів зі складною формою поперечного перерізу. У таких виробках необхідно забезпечити рівномірний течію металу через канали матриці, стабільність товщини стінок, мінімальні відхилення від заданої геометрії та відсутність поверхневих дефектів. Це потребує раціонального вибору температурно-швидкісних режимів, конструкції інструменту, умов тертя, способу охолодження та подальшої термічної обробки.

Актуальність дослідження полягає в необхідності систематизації технологічних чинників, які визначають якість профілів з алюмінієвих сплавів для авіаційних конструкцій. Такий підхід дозволяє розглядати профіль не лише як напівфабрикат, а як відповідальний елемент виробничого ланцюга, властивості якого формуються на всіх етапах технологічного процесу.



Постановка проблеми

У сучасному авіаційному виробництві пресовані профілі з алюмінієвих сплавів мають відповідати підвищеним вимогам до точності, стабільності властивостей, якості поверхні та експлуатаційної надійності. Однак процес їх виготовлення є багатфакторним і залежить від значної кількості параметрів: хімічного складу сплаву, структури вихідної заготовки, режиму гомогенізації, температури нагрівання, швидкості пресування, коефіцієнта витяжки, геометрії матриці, умов тертя, інтенсивності охолодження та режимів старіння.

Недостатній контроль хоча б одного з цих параметрів може спричинити появу дефектів або нестабільність властивостей профілю. Наприклад, нерівномірність температури заготовки може призвести до нерівномірного течії металу, викривлення профілю або локальної неоднорідності структури. Надмірна швидкість пресування може погіршувати якість поверхні та сприяти появі дефектів, пов'язаних із локальним перегріванням. Нераціональна геометрія матриці може спричинити нерівномірний розподіл швидкості течії металу та відхилення форми поперечного перерізу.

Таким чином, актуальною є задача узагальнення технологічних чинників виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів і визначення їх впливу на якість виробів авіаційного призначення.

1.2. Стан питання

Алюмінієві сплави тривалий час залишаються однією з основних груп конструкційних матеріалів, що застосовуються у виробництві авіаційної техніки. Їх використання зумовлене поєднанням малої густини, достатньої міцності, доброї технологічності, корозійної стійкості та можливості отримання широкої номенклатури напівфабрикатів. Особливе місце серед таких напівфабрикатів займають пресовані профілі, які дозволяють створювати елементи складної форми з високим співвідношенням міцності до маси [3-5]. Сучасні оглядові роботи з високоміцних алюмінієвих сплавів для аерокосмічного застосування підкреслюють, що для 7xxx і Al-Li систем вирішальним є не лише рівень міцності, а й керування формуванням мікроструктури, анізотропією, пластичністю та тріщиностійкістю після деформування й термічної обробки [13, 17].

У сучасному авіабудуванні профілі з алюмінієвих сплавів застосовуються як елементи каркаса, підкріплювальні деталі панелей, стрингери, напрямні, кронштейни, стикувальні елементи та інші конструктивні компоненти. Їхня перевага полягає в можливості формування складного поперечного перерізу без значного збільшення маси конструкції.

У наукових роботах, присвячених технології пресування алюмінієвих сплавів, значна увага приділяється впливу температури заготовки, швидкості пресування, ступеня деформації, геометрії інструменту та умов тертя на течію металу в матриці. Поєднання цих чинників визначає рівномірність формування поперечного перерізу профілю, якість поверхні, точність геометричних параметрів і структуру матеріалу після деформування [6-8]. У роботах останніх років показано, що чисельне моделювання пресування профілів, аналіз розподілу напружень, деформацій, швидкості деформації та температури дозволяють обґрунтовувати параметри реального промислового процесу для складних профілів [14]. Водночас експериментальні дослідження підтверджують істотний вплив коефіцієнта витяжки на зеренну структуру, текстуру та механічні властивості Al-Mg-Si-Cu сплавів [16].

Окремим напрямом досліджень є вплив термічної обробки на механічні властивості профілів з алюмінієвих сплавів. Для високоміцних сплавів систем Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu та Al-Mg-Si важливу роль відіграють режими гартування й старіння, які визначають рівень міцності, пластичності, тріщиностійкості та корозійної поведінки матеріалу [9-11]. Для сплавів авіаційного призначення типу 2024 та Al-Cu-Li особливо актуальним є поєднання пресування, попереднього деформування, старіння та інших термо-механічних операцій, оскільки саме така комбінація визначає баланс міцності й пластичності шляхом керованого формування дислокаційної структури та виділень зміцнювальних фаз [15, 18, 19].

Попри значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам пресування алюмінієвих сплавів, актуальним залишається комплексний розгляд технологічного процесу виготовлення профілів саме з позиції авіаційного виробництва. Для таких виробів важливими є не лише механічні властивості матеріалів, а й геометрична точність, якість поверхні, стабільність структури, контроль залишкових напружень, придатність до подальшого складання та надійність в експлуатації. Отже, сучасна література підтверджує актуальність комплексного підходу до технології виготовлення профілів, згідно з яким геометрична точність, стан поверхні, термічна історія та структурна однорідність розглядаються як взаємопов'язані показники якості, а не як ізольовані характеристики виробу [13-19].

1.3. Мета й завдання

Метою статті є аналіз технологічних особливостей виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів для елементів авіаційних конструкцій та визначення

основних чинників, що впливають на якість, геометричну точність і експлуатаційні властивості таких виробів.

Для досягнення поставленої мети в межах цієї публікації необхідно вирішити такі завдання:

- 1) проаналізувати основні етапи технологічного процесу виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів;
- 2) визначити ключові технологічні параметри, що впливають на якість профілів;
- 3) систематизувати типові дефекти профілів і причини їх виникнення;
- 4) оцінити роль термічної обробки в формуванні властивостей профілів;
- 5) запропонувати узагальнену схему технологічного забезпечення якості профілів для авіаційних конструкцій.

Стаття структурована таким чином: у розділі 2 наведено матеріали та методику аналітичного дослідження; у розділі 3 подано результати узагальнення технологічних чинників і їх обговорення; у розділі 4 сформульовано висновки та напрями подальших досліджень.

2. Матеріали та методи дослідження

У роботі використано аналітичний підхід, що передбачає систематизацію технологічних чинників виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів для авіаційних конструкцій. Основну увагу приділено взаємозв'язку між параметрами технологічного процесу, структурою матеріалу, геометричною точністю профілю, якістю поверхні та експлуатаційними властивостями готового виробу.

Об'єктом аналізу є технологічний процес виготовлення пресованих профілів з алюмінієвих сплавів, що можуть застосовуватися в елементах авіаційних конструкцій. Предметом аналізу є вплив основних технологічних параметрів на якість профілю та стабільність його властивостей.

Методика дослідження ґрунтується на порівняльному аналізі зазначених чинників і встановленні їхнього впливу на формування властивостей профілів. У межах роботи не ставиться завдання отримання нових експериментальних залежностей. Основним результатом є узагальнення технологічних параметрів, які доцільно враховувати під час виготовлення профілів авіаційного призначення.

Такий підхід дозволяє розглядати якість профілю як результат сукупної дії всіх етапів виробничого процесу - від підготовки заготовки до остаточного контролю готового виробу. Це особливо важливо для авіаційних конструкцій, де дефекти напів-

фабрикату можуть проявлятися не лише на етапі виготовлення деталі, а й під час складання, експлуатації або ремонту.

3. Результати та обговорення

3.1. Основні технологічні етапи виготовлення профілів

Технологічний процес виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів є багатостадійним і включає комплекс операцій, кожна з яких впливає на якість готового виробу. Для авіаційних конструкцій особливе значення має стабільність процесу, оскільки профіль повинен відповідати одночасно вимогам до геометричної точності, механічних властивостей, якості поверхні та технологічної придатності до подальшого складання.

У загальному вигляді технологічний маршрут виготовлення профілів містить такі етапи: отримання або підготовка литої заготовки; гомогенізація зливків або пресових заготовок; різання заготовок на елементи мірної довжини; нагрівання заготовки перед пресуванням; підготовка інструменту та контейнера; пресування профілю через матрицю; охолодження профілю після виходу з матриці; правлення або розтягування; термічна обробка; різання профілів на задану довжину; контроль геометрії, поверхні та механічних властивостей.

Кожна з цих операцій має власне технологічне призначення. Підготовка заготовки забезпечує необхідну якість вихідного матеріалу. Гомогенізація спрямована на вирівнювання хімічної неоднорідності, зменшення ліквациї та підготовку структури до подальшого пластичного деформування. Нагрівання заготовки забезпечує необхідну пластичність матеріалу під час пресування. Безпосередньо процес пресування формує поперечний переріз профілю, а подальше охолодження, правлення й термічна обробка визначають остаточний рівень властивостей виробу.

Для авіаційних профілів особливо важливим є контроль температурно-швидкісних параметрів пресування. Надмірно низька температура може призвести до підвищення зусилля пресування, недостатньої пластичності матеріалу та появи тріщин. Надмірно висока температура, навпаки, може спричинити локальний перегрів, погіршення якості поверхні, укрупнення зерен або зниження механічних властивостей після термічної обробки. Це узгоджується з сучасними результатами моделювання процесів пресування, де температурно-швидкісні параметри розглядаються як визначальні для розподілу деформацій і термічного стану профілю [14].

Важливим етапом є охолодження профілю після виходу з матриці. Для термічно зміцнюваних

алюмінієвих сплавів швидкість охолодження може суттєво впливати на подальшу здатність матеріалу до старіння та формування необхідного рівня міцності. Нерівномірне охолодження може призводити до залишкових напружень, викривлення профілю або нестабільності механічних властивостей по довжині виробу.

Операції правлення та розтягування застосовуються для зменшення викривлення, стабілізації геометричних параметрів і зниження залишкових напружень. Для тонкостінних профілів ці операції потребують особливої уваги, оскільки надмірне або нерівномірне розтягування може спричинити локальну деформацію стінок, зміну форми перерізу або появу додаткових дефектів.

Узагальнену схему технологічного процесу виготовлення профілю з алюмінієвого сплаву наведено на рис. 1.



Рис. 1. Узагальнена схема технологічного процесу виготовлення профілю з алюмінієвого сплаву

Наведена схема відображає послідовність основних операцій, під час яких формуються геометричні параметри, структурний стан і майбутні експлуатаційні властивості профілю. Важливо, що критичними для авіаційних напівфабрикатів є не лише операції деформування, а й етапи гомогенізації, охолодження та подальшої термічної обробки.

Як видно з табл. 1, якість профілю формується не на одному окремому етапі, а впродовж усього технологічного маршруту. Тому для виробів авіаційного призначення важливим є не лише дотримання режимів пресування, а й контроль попередніх і наступних операцій. Порушення на етапі підготовки заготовки або термічної обробки може суттєво знизити ефективність навіть правильно організованого процесу формоутворення.

Таблиця 1
Основні етапи виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів та їх технологічне призначення

Етап технологічного процесу	Основне призначення	Можливий вплив на якість профілю
Підготовка заготовки	Забезпечення необхідного хімічного складу, структури та якості вихідного матеріалу	Впливає на однорідність структури, наявність внутрішніх дефектів і стабільність деформації
Гомогенізація	Зменшення ліквідації та вирівнювання структури	Покращує пластичність, знижує ризик тріщиноутворення
Нагрівання перед пресуванням	Забезпечення необхідної пластичності матеріалу	Впливає на зусилля пресування, течію металу та якість поверхні
Пресування	Формування заданого поперечного перерізу профілю	Визначає геометрію, точність, розподіл деформацій і можливість появи дефектів
Охолодження	Фіксація структурного стану після деформування	Впливає на залишкові напруження, викривлення та подальше зміцнення
Правлення / розтягування	Усунення викривлення та стабілізація форми	Покращує геометричну точність, але може спричинити локальні деформації
Термічна обробка	Формування необхідного комплексу механічних властивостей	Визначає міцність, пластичність, стабільність властивостей і корозійну поведінку
Контроль якості	Перевірка відповідності профілю вимогам	Дозволяє виявити геометричні, поверхневі та структурні дефекти

3.2. Вплив технологічних параметрів на якість профілів

Якість профілів з алюмінієвих сплавів визначається сукупністю технологічних параметрів, які впливають на течію металу, формування структури,

стан поверхні та геометричну точність виробу. Найбільш важливими серед них є температура заготовки, швидкість пресування, ступінь деформації, конструкція матриці, умови тертя та режим охолодження. У сучасних дослідженнях такі параметри також пов'язують із розвитком мікроструктури, зміною зеренного стану та формуванням механічних властивостей після старіння або додаткових термо-механічних операцій [15-19].

Температура заготовки є одним із ключових параметрів процесу пресування. Вона визначає пластичність матеріалу, опір деформації, зусилля пресування та схильність до появи дефектів. При недостатній температурі матеріал має підвищений опір деформації, що може призвести до збільшення навантаження на інструмент, нерівномірного течії металу та появи тріщин. Надмірна температура може спричинити локальне перегрівання, зниження якості поверхні, укрупнення зерен або погіршення властивостей після старіння.

Швидкість пресування впливає на тепловий стан процесу, якість поверхні та рівномірність формування профілю. Збільшення швидкості може підвищувати продуктивність, однак для авіаційних профілів продуктивність не може розглядатися окремо від якості. Надмірна швидкість пресування може сприяти появі поверхневих дефектів, нерівномірності деформації та локальному перегріванню металу.

Ступінь деформації визначає інтенсивність пластичного формоутворення та впливає на структуру матеріалу. За недостатньої деформації може не забезпечуватися необхідне подрібнення структури або рівномірність властивостей. Надмірна деформація може збільшувати зусилля пресування та підвищувати ризик дефектів у складних тонкостінних профілях.

Геометрія матриці має визначальне значення для формування профілів складного перерізу. Нерівномірний опір течії металу в різних ділянках матриці може призводити до нерівномірного виходу профілю, викривлення, хвилястості або відхилення товщини стінок. Тому під час проектування інструменту необхідно враховувати балансування швидкостей течії металу, особливості форми профілю та умови тертя.

Умови тертя між металом, контейнером і матрицею впливають на розподіл деформації, температуру процесу та якість поверхні. Підвищене тертя може спричиняти збільшення зусилля пресування, нерівномірний течію металу та погіршення стану поверхні. Зменшення тертя за рахунок раціональної підготовки інструменту, стану поверхні та технологічних режимів сприяє стабільнішому формуванню профілю.

Режим охолодження після пресування є важливим для термічно зміцнених алюмінієвих сплавів. Саме він значною мірою визначає подальшу здатність матеріалу до старіння, рівень залишкових напружень і стабільність геометрії. Нерівномірне охолодження особливо небезпечно для тонкостінних профілів, оскільки може призводити до викривлення або локальних деформацій.

Основні фактори, що впливають на якість пресованого профілю, узагальнено на рис. 2.

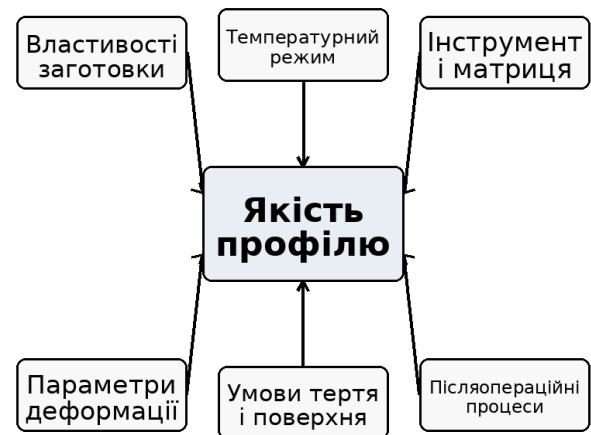


Рис. 2. Основні фактори, що впливають на якість пресованого профілю

Як випливає з рис. 2, забезпечення високої якості профілю має багатофакторний характер. Це означає, що коригування лише одного параметра не завжди дає очікуваний результат без одночасного врахування якості заготовки, параметрів деформування, стану інструменту та післяопераційних процесів.

Дані табл. 2 підтверджують, що технологічні параметри пресування діють взаємопов'язано. Зміна одного параметра може потребувати коригування інших, оскільки якість профілю визначається загальним балансом температурного, деформаційного та швидкісного режимів. Для авіаційних виробів це особливо важливо, оскільки допустимі відхилення геометрії та властивостей є значно жорсткішими, ніж для менш відповідальних виробів загального машинобудування.

Для наочнішого представлення відносної значущості основних технологічних чинників на рис. 3 наведено узагальнений графік експертної оцінки їхнього впливу на якість профілю.

Графік на рис. 3 має узагальнювальний характер і підтверджує, що найбільш критичними для якості авіаційних профілів є геометрія матриці, температура нагрівання та режими термічної обробки. Водночас навіть чинники з дещо нижчою оцінкою не можуть розглядатися ізольовано, оскільки вони впливають на відтворюваність процесу й стабільність властивостей у комплексі.

Таблиця 2
Вплив основних технологічних параметрів на якість профілів з алюмінієвих сплавів

Технологічний параметр	Основний вплив	Можливі негативні наслідки при порушенні режиму
Температура заготовки	Визначає пластичність, опір деформації та зусилля пресування	Тріщини, локальний перегрів, погіршення структури, дефекти поверхні
Швидкість пресування	Впливає на продуктивність, тепловий стан і якість поверхні	Поверхневі дефекти, нерівномірна деформація, викривлення
Ступінь деформації	Формує структуру та механічні властивості	Недостатня однорідність або надмірне навантаження на інструмент
Геометрія матриці	Забезпечує формування заданого поперечного перерізу	Нерівномірний вихід металу, різна товщина стінок, викривлення
Умови тертя	Впливають на течію металу та якість поверхні	Збільшення зусилля, задири, нерівномірність деформації
Режим охолодження	Визначає залишкові напруження та здатність до старіння	Викривлення, нестабільність властивостей, внутрішні напруження
Режим старіння	Формує остаточний рівень механічних властивостей	Недостатня міцність, зниження пластичності, нестабільність властивостей

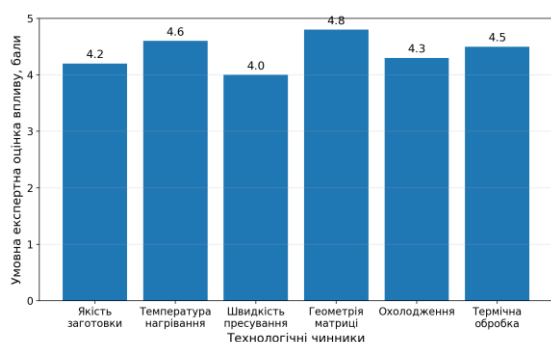


Рис. 3. Узагальнена експертна оцінка впливу технологічних чинників на якість профілю

3.3. Типові дефекти профілів і технологічні причини їх виникнення

Під час виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів можуть виникати дефекти, які погіршують геометричну точність, якість поверхні, механічні

властивості та експлуатаційну надійність виробу. Для авіаційних конструкцій наявність таких дефектів є особливо небажаною, оскільки профілі часто виконують функції підкріплювальних, несучих або стикувальних елементів.

До найбільш поширених дефектів пресованих профілів належать: викривлення профілю; хвилястість стінок; нерівномірна товщина елементів перерізу; поверхневі тріщини; задири та подряпини; розшарування; грубозерниста структура; залишкові напруження; локальна неоднорідність механічних властивостей; відхилення геометрії поперечного перерізу.

Викривлення профілю може бути зумовлене нерівномірним течією металу через матрицю, різницею швидкостей виходу окремих ділянок профілю, нерівномірним охолодженням або недостатньо ефективним правлінням після пресування. Особливо чутливими до викривлення є тонкостінні профілі зі складною формою поперечного перерізу, в яких навіть незначна нерівномірність швидкості течії металу може призводити до помітного відхилення форми.

Хвилястість стінок і локальні деформації можуть виникати внаслідок недостатньої жорсткості окремих елементів перерізу, нерівномірного розподілу деформацій або неправильного режиму розтягування. Для авіаційних профілів такі дефекти є небезпечними не лише з погляду зовнішнього вигляду, а й через можливе зниження стійкості тонкостінних елементів під час експлуатаційного навантаження.

Поверхневі тріщини можуть бути наслідком надмірного опору деформації, недостатньої температури заготовки, підвищеної швидкості пресування або несприятливого стану поверхні інструменту. У деяких випадках тріщини формуються через локальне перегрівання, коли температура в зоні деформації перевищує допустимий рівень для конкретного сплаву.

Задири, подряпини та інші поверхневі пошкодження часто пов'язані зі станом робочих поверхонь матриці, наявністю забруднень, нерівномірністю тертя або недостатньою підготовкою інструменту. Для авіаційних виробів якість поверхні має важливе значення, оскільки поверхневі дефекти можуть бути концентраторами напружень і знижувати втомну довговічність.

Як видно з табл. 3, більшість дефектів профілів має не одиничну, а комплексну природу. Один і той самий дефект може бути наслідком поєднання кількох технологічних причин, тому його усунення потребує аналізу всього маршруту виготовлення. Для авіаційних конструкцій особливо важливо не лише виявляти дефекти після виготовлення, а й попереджувати їх появу шляхом стабілізації технологічних параметрів.

Таблиця 3
Типові дефекти профілів з алюмінієвих сплавів та можливі технологічні причини їх виникнення

Тип дефекту	Можливі технологічні причини	Наслідки для профілю
Викривлення профілю	Нерівномірний вихід металу з матриці, нерівномірне охолодження, недостатнє правлення	Відхилення геометрії, ускладнення складання
Хвилястість стінок	Недостатня жорсткість тонкостінних елементів, нерівномірна деформація, неправильне розтягування	Зниження точності та стійкості елементів
Нерівномірна товщина стінок	Нераціональна геометрія матриці, різний опір течії металу	Погіршення несучої здатності, нестабільність маси
Поверхневі тріщини	Низька температура, надмірна швидкість пресування, локальний перегрів	Зниження втомної довговічності та ресурсу
Задири й подряпини	Зношення інструменту, забруднення поверхні, підвищене тертя	Погіршення якості поверхні, концентрація напружень
Розшарування	Дефекти заготовки, ліквіація, неметалеві включення, недостатня гомогенізація	Зниження міцності та надійності
Грубозерниста структура	Перегрів, порушення режимів деформації або термічної обробки	Нестабільність властивостей, зниження пластичності
Залишкові напруження	Нерівномірне охолодження, недостатнє розтягування або правлення	Викривлення під час обробки, зниження стабільності форми

Доцільним є також подання схеми керування технологічними параметрами, що узагальнює основні контрольовані впливи для запобігання дефектам під час виготовлення профілів (рис. 4).

Схема на рис. 4 підкреслює, що запобігання дефектам під час виготовлення профілів повинно ґрунтуватися на послідовному керуванні якістю заготовки, нагріванням, параметрами пресування, станом інструменту, режимами охолодження та контролем геометрії, поверхні й структури. Такий підхід спрямований саме на зниження ризику технологічних дефектів у виробничому процесі.

3.4. Роль термічної обробки у формуванні властивостей профілів

Термічна обробка є одним із ключових етапів виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів авіаційного призначення. Вона визначає остаточний рівень міцності, пластичності, тріщиностійкості, коро-

зійної стійкості та стабільності властивостей готового виробу. Для термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавів особливе значення мають операції гартування та старіння.

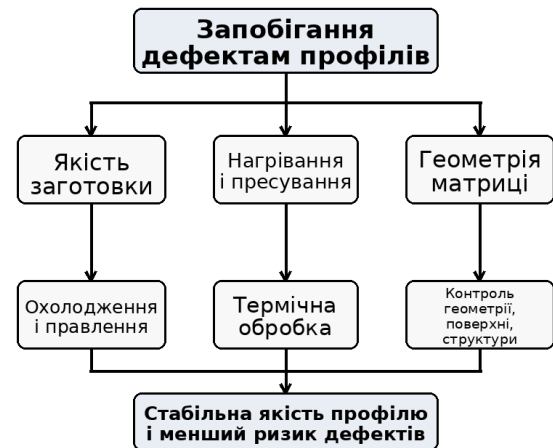


Рис. 4. Керування технологічним процесом для запобігання дефектам профілів

Гомогенізація зливків або пресових заготовок проводиться перед пресуванням і спрямована на вирівнювання хімічної неоднорідності, зменшення ліквіації та поліпшення пластичності матеріалу. Недостатня гомогенізація може призвести до нерівномірного течії металу під час пресування, локального зниження пластичності та підвищеної схильності до утворення тріщин.

Гартування після нагрівання або пресування застосовується для фіксації пересиченого твердого розчину. Для профілів складного перерізу важливим є забезпечення достатньої швидкості охолодження без надмірного викривлення. Надто повільне охолодження може знижувати ефективність подальшого старіння, а надмірно інтенсивне й нерівномірне охолодження може спричиняти залишкові напруження та зміну форми профілю.

Старіння є завершальним етапом термічного зміцнення. Воно може бути природним або штучним залежно від системи легування сплаву та вимог до властивостей. Під час старіння формуються дисперсні виділення зміцнювальних фаз, які забезпечують підвищення міцності матеріалу. Водночас надмірне старіння може призводити до зниження пластичності або погіршення тріщиностійкості.

Для авіаційних профілів важливо забезпечити не лише високий рівень міцності, а й стабільність властивостей по довжині профілю та в різних зонах поперечного перерізу. Це особливо актуально для профілів зі змінною товщиною стінок, складною геометрією та різною інтенсивністю охолодження окремих ділянок.

Термічна обробка також впливає на залишкові напруження. Нерівномірність охолодження, різна товщина елементів перерізу та складна форма профілю можуть спричинити внутрішні напруження, які проявляються під час механічної обробки, складання або експлуатації. Тому для відповідальних профілів доцільно застосовувати операції розтягування, стабілізації або контрольованого старіння.

Таблиця 4
Вплив операцій термічної обробки на властивості профілів з алюмінієвих сплавів

Операція	Основне призначення	Вплив на властивості профілю	Можливі ризики при порушенні режиму
Гомогенізація	Вирівнювання хімічної неоднорідності та структури	Підвищення пластичності, стабільність пресування	Ліквіація, тріщини, нерівномірна структура
Нагрівання під пресування	Забезпечення пластичності перед деформуванням	Зменшення опору деформації, поліпшення течії металу	Перегрів, грубозернистість, дефекти поверхні
Гартування	Фіксація пересиченого твердого розчину	Підготовка до старіння, формування потенціалу зміцнення	Викривлення, залишкові напруження, недостатнє зміцнення
Природне старіння	Формування властивостей за кімнатної температури	Поступове підвищення міцності	Нестабільність властивостей у часі
Штучне старіння	Прискорене формування зміцнювальних фаз	Досягнення заданого рівня міцності та стабільності	Перестарювання, зниження пластичності
Стабілізуювальна обробка	Зменшення залишкових напружень	Підвищення стабільності форми	Недостатній ефект при неправильному режимі

Дані табл. 4 показують, що термічна обробка не є допоміжною операцією, а безпосередньо формує експлуатаційні властивості профілю. Для авіаційних конструкцій важливо забезпечити узгодження режимів пресування, охолодження та старіння, оскільки саме їх поєднання визначає кінцевий структурний стан матеріалу.

3.5. Технологічне забезпечення якості профілів авіаційного призначення

Забезпечення якості профілів з алюмінієвих сплавів для авіаційних конструкцій має базуватися на системному контролі всіх етапів технологічного процесу. Якість готового профілю визначається не лише параметрами пресування, а й станом вихідної заготовки, режимами термічної обробки, точністю інструменту, умовами охолодження, операціями правлення та методами контролю.

Одним із головних завдань є забезпечення стабільності геометричних параметрів. Для авіаційних профілів важливими є точність товщини стінок, прямолінійність, стабільність форми поперечного перерізу, відсутність хвилястості та відповідність розмірів кресленню. Порушення геометрії може ускладнювати складання вузлів, збільшувати трудомісткість припасування та знижувати якість з'єднань.

Другим важливим напрямом є забезпечення якості поверхні. Поверхневі дефекти можуть виступати концентраторами напружень і знижувати втомну довговічність. Тому контроль стану поверхні має проводитися не лише після виготовлення, а й на етапах підготовки інструменту, очищення заготовки, пресування та післяопераційного огляду.

Третім напрямом є контроль структури та механічних властивостей. Для авіаційних профілів необхідно забезпечити стабільний рівень міцності, пластичності та тріщиностійкості. Особливу увагу слід приділяти однорідності властивостей по довжині профілю та в різних зонах поперечного перерізу, оскільки нерівномірність охолодження або деформації може призводити до локальних відмінностей структури.

Окреме значення має контроль залишкових напружень. Вони можуть з'являтися під час різання, механічної обробки, складання або експлуатації. Для зменшення залишкових напружень застосовують розтягування, правлення, стабілізуювальну термічну обробку та контрольоване охолодження.

Для забезпечення стабільної якості доцільно використовувати комплексний підхід, який включає: контроль якості вихідної заготовки; контроль температури нагрівання; контроль швидкості пресування; оцінку стану матриці та інструменту; контроль охолодження; перевірку геометрії профілю; контроль поверхневих дефектів; механічні випробування; металографічний аналіз; неруйнівний контроль для відповідальних виробів.

Таким чином, технологічне забезпечення якості профілів авіаційного призначення має розглядатися як багаторівнева система, що охоплює матеріал, інструмент, параметри процесу, термічну обробку та контроль готового виробу.

Узагальнену систему технологічного забезпечення якості профілів авіаційного призначення наведено на рис. 5.



Рис. 5. Система технологічного забезпечення якості профілів авіаційного призначення

Рис. 5 демонструє, що система забезпечення якості має наскрізний характер і повинна охоплювати всі стадії виробництва – від оцінювання властивостей вихідної заготовки до контролю готового профілю. Така побудова процесу дозволяє своєчасно виявляти відхилення та мінімізувати ризик накопичення помилок на наступних операціях.

Отже, досягнення стабільної якості профілю в авіаційному виробництві пов'язане з переходом від контролю окремих параметрів до керування всією технологічною системою в цілому. Це створює підґрунтя для підвищення відтворюваності процесу, покращення експлуатаційних характеристик профілів і зменшення частки технологічного браку.

Обговорення результатів

Проведений аналіз показує, що для профілів з алюмінієвих сплавів, призначених для авіаційних конструкцій, вирішальне значення має не окремий технологічний параметр, а узгодженість усього технологічного маршруту. Ефективність застосування пресованих профілів визначається поєднанням якостей вихідної заготовки, конструкції інструменту, режимів деформації, охолодження та термічної обробки.

На відміну від профілів загального машинобудівного призначення, профілі для авіаційних конструкцій потребують підвищеної точності, стабільності властивостей і високої надійності в експлуатації. Саме тому доцільним є застосування системного підходу до керування якістю, в межах якого всі стадії виробництва розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної технологічної системи.

Узагальнення технологічних факторів дозволяє виділити критичні точки процесу: нагрівання заготовки, проектування матриці, режим пресування, інтенсивність охолодження та операції термічного зміцнення. Контроль цих етапів є найбільш ефективним способом зниження ризику виникнення дефектів, стабілізації геометрії та підвищення відтворюваності властивостей профілю.

Практичне значення наведених положень полягає в тому, що вони можуть бути використані під час розроблення маршрутів виготовлення профілів, вибору параметрів пресування, підготовки технічних вимог до інструменту та побудови системи контролю якості на підприємствах авіаційного профілю. Запропонована логіка оцінювання технологічних чинників дозволяє розглядати профіль як результат керованої послідовності операцій, а не як окремий напівфабрикат після пресування. Це підсилює прикладну цінність роботи для виробництва деталей і вузлів літальних апаратів.

Одержані узагальнення можуть бути використані як вихідна основа для подальшого створення параметричних моделей процесу пресування, вибору допустимих технологічних вікон і формування карт контролю якості для профілів зі складною геометрією поперечного перерізу.

4. Висновки

1. Проаналізовано технологічний маршрут виготовлення профілів з алюмінієвих сплавів для елементів авіаційних конструкцій. Показано, що якість профілю формується не лише на стадії пресування, а протягом усієї послідовності операцій – від підготовки заготовки та гомогенізації до охолодження, правлення, термічної обробки й кінцевого контролю.

2. Встановлено, що найбільш суттєвими технологічними чинниками є температура заготовки, швидкість пресування, ступінь деформації, геометрія матриці, умови тертя, режим охолодження та параметри старіння. Їхній вплив має взаємопов'язаний характер, тому оптимізація процесу має виконуватися не за окремими параметрами, а за узгодженою системою керування технологічним маршрутом.

3. Систематизовано типові дефекти пресованих профілів – викривлення, хвилястість, нерівномірність товщини стінок, поверхневі тріщини, задири, розшарування, грубозерниста структура та залишкові напруження. Показано, що більшість дефектів має комплексну природу, а їх попередження потребує контролю якості заготовки, інструменту, температурно-швидкісного режиму, охолодження та термічної обробки.

4. Обґрунтовано роль термічної обробки як одного з ключових етапів формування кінцевого комплексу властивостей профілів. Для виробів авіаційного призначення особливо важливим є узгодження гомогенізації, нагрівання, гартування, природного або штучного старіння з вимогами до міцності, пластичності, стабільності форми та корозійної стійкості.

5. Запропоновано узагальнену систему технологічного забезпечення якості профілів авіаційного призначення, що поєднує контроль вихідної заготовки, параметрів пресування, охолодження, правлення, термічної обробки, геометрії, поверхні та механічних властивостей. Практичне використання такої системи дає змогу зменшити ризик технологічних дефектів, підвищити відтворюваність процесу та забезпечити стабільність характеристик профілів у виробництві авіаційних конструкцій.

6. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне моделювання впливу температурно-швидкісних режимів і геометрії матриці на течію металу, залишкові напруження та точність профілів складного поперечного перерізу.

Внесок автора

Автор самостійно виконав постановку задачі, аналіз літературних джерел, систематизацію технологічних чинників, узагальнення результатів та підготовку рукопису статті.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження та його результати, подані в цій статті.

Фінансування

Це дослідження виконано без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних у відкритому репозитарії; усі використані джерела наведено у списку літератури.

Використання штучного інтелекту

Автор використав цифрові інструменти в допустимих межах для мовного та технічного редагування рукопису. Усі наукові положення, висновки, посилання на джерела та змістові узагальнення перевірені автором; рукопис не містить вигаданих експериментальних результатів або недостовірних числових даних.

Подяки

Автор висловлює подяку редакції журналу за надані рекомендації щодо оформлення рукопису.

Автор прочитав і погодив остаточний варіант рукопису.

Література

1. Campbell, F. C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials* / F. C. Campbell. – Oxford : Elsevier, 2006. – 608 p.
2. Mouritz, A. P. *Introduction to Aerospace Materials* / A. P. Mouritz. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2012. – 640 p.
3. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals* / I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, M. Qian. – 5th ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 544 p.
4. Davis, J. R. *Aluminum and Aluminum Alloys* / J. R. Davis. – Materials Park, Ohio : ASM International, 1993. – 784 p.
5. Hatch, J. E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy* / J. E. Hatch. – Metals Park, Ohio : ASM International, 1984. – 424 p.
6. Totten, G. E. *Handbook of Aluminum. Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes* / G. E. Totten, D. S. MacKenzie. – New York : Marcel Dekker, 2003. – 720 p.
7. Sheppard, T. *Extrusion of Aluminium Alloys* / T. Sheppard. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999. – 394 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-3001-2
8. Valberg, H. S. *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis* / H. S. Valberg. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 476 p. DOI: 10.1017/CBO9780511801907
9. *ASM Handbook. Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming*. – Materials Park, Ohio : ASM International, 2005. – 978 p.
10. *ASM Handbook. Volume 4: Heat Treating*. – Materials Park, Ohio : ASM International, 1991. – 2173 p.
11. Starink, M. J. *Analysis of aluminium based alloys by calorimetry: quantitative analysis of reactions and reaction kinetics* / M. J. Starink // *International Materials Reviews*. – 2004. – Vol. 49, iss. 3–4. – P. 191–226. DOI: 10.1179/095066004225010532.
12. Hirsch, J. *Superior light metals by texture engineering: optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications* / J. Hirsch, T. Al-Samman // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61, iss. 3. – P. 818–843. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.044.
13. Wang, Y. *Hot Extrusion Processing of Al-Li Alloy Profiles and Related Issues: A Review* / Y. Wang, G. Zhao // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 33. – 24 p. DOI: 10.1186/s10033-020-00479-7.
14. *Analysis of the Extrusion Process of Aluminium Alloy Profiles* / T. Bajor, A. Kawalek, S. Berski et al. // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, iss. 23. – 14 p. DOI: 10.3390/ma15238311.

15. *The Effect of Extrusion and Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of 2024 Aluminum Alloy* / Q. Li, X. Zhang, L. Wang, J. Qiao // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, iss. 21. – 14 p. DOI: 10.3390/ma15217566.

16. *Effect of Extrusion Ratio on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-0.5Mg-0.4Si-0.1Cu Alloy* / C. Ni, X. Xia, J. Dai et al. // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, iss. 4. – 13 p. DOI: 10.3390/met13040669.

17. *A Review on Ultra-High-Strength Aluminum Alloys for Aerospace Applications: Forming, Microstructure, and Mechanical Properties* / X. Xu, G. Wu, L. Zhang et al. // *Materials*. – 2026. – Vol. 19, iss. 9. – 28 p. DOI: 10.3390/ma19091809.

18. *Enhancing strength-ductility synergy in an extruded Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy via homogeneous GP zones and dislocation configuration* / X. Xu, G. Wu, X. Tong et al. // *Materials & Design*. – 2024. – Vol. 239. – 17 p. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112766.

19. *Achieving superior strength-ductility balance by tailoring dislocation density and shearable GP zone of extruded Al-Cu-Li alloy* / X. Xu, G. Wu, X. Tong et al. // *International Journal of Plasticity*. – 2024. – Vol. 182. – 14 p. DOI: 10.1016/j.ijplas.2024.104135.

References

1. Campbell, F. C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Oxford, Elsevier, 2006. 608 p.

2. Mouritz, A. P. *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge, Woodhead Publishing, 2012. 640 p.

3. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., Qian, M. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*. 5th ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2017. 544 p.

4. Davis, J. R. *Aluminum and Aluminum Alloys*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1993. 784 p.

5. Hatch, J. E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Metals Park, Ohio, ASM International, 1984. 424 p.

6. Totten, G. E., MacKenzie, D. S. *Handbook of Aluminum. Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*. New York, Marcel Dekker, 2003. 720 p.

7. Sheppard, T. *Extrusion of Aluminium Alloys*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1999. 394 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-3001-2.

8. Valberg, H. S. *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. 476 p. DOI: 10.1017/CBO9780511801907.

9. *ASM Handbook. Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2005. 978 p.

10. *ASM Handbook. Volume 4: Heat Treating*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1991. 2173 p.

11. Starink, M. J. Aging of aluminium alloys: mechanisms, property effects and process optimisation. *International Materials Reviews*, 2004, vol. 49, iss. 3-4, pp. 191-226. DOI: 10.1179/095066004225010532.

12. Hirsch, J., Al-Samman, T. Superior light metals by texture engineering: optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, iss. 3, pp. 818-843. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.10.044.

13. Wang, Y., Zhao, G. Hot Extrusion Processing of Al-Li Alloy Profiles and Related Issues: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 33, 24 p. DOI: 10.1186/s10033-020-00479-7.

14. Bajor, T., Kawalek, A., Berski, S., Jurczak, H., Borowski, J. Analysis of the Extrusion Process of Aluminium Alloy Profiles. *Materials*, 2022, vol. 15, iss. 23. 14 p. DOI: 10.3390/ma15238311.

15. Li, Q., Zhang, X., Wang, L., Qiao, J. The Effect of Extrusion and Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of 2024 Aluminum Alloy. *Materials*, 2022, Vol. 15, iss. 21. 14 p. DOI: 10.3390/ma15217566.

16. Ni, C., Xia, X., Dai, J., Ding, J., Wang, Y., Wang, J., Liu, Y. Effect of Extrusion Ratio on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-0.5Mg-0.4Si-0.1Cu Alloy. *Metals*, 2023, vol. 13, iss. 4. 13 p. DOI: 10.3390/met13040669.

17. Xu, X., Wu, G., Zhang, L., Tong, X., Fu, H., Zhang, Z., Zhang, H., Zhang, X., Feng, X., Mao, M., Xie, J. A Review on Ultra-High-Strength Aluminum Alloys for Aerospace Applications: Forming, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials*, 2026, vol. 19, iss. 9. 28 p. DOI: 10.3390/ma19091809.

18. Xu, X., Wu, G., Tong, X., Zhang, L., Wang, C., Qi, F., Guo, Y., Zeng, X. Enhancing strength-ductility synergy in an extruded Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy via homogeneous GP zones and dislocation configuration. *Materials & Design*, 2024, vol. 239. 17 p. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112766.

19. Xu, X., Wu, G., Tong, X., Zhang, L., Wang, C., Qi, F., Zeng, X., Guo, Y. Achieving superior strength-ductility balance by tailoring dislocation density and shearable GP zone of extruded Al-Cu-Li alloy. *International Journal of Plasticity*, 2024, vol. 182. 14 p. DOI: 10.1016/j.ijplas.2024.104135.

Надійшла до редакції 29.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 15.07.2026,
Дата ухвалення 17.08.2026, дата публікації 26.08.2026

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING ALUMINUM ALLOY PROFILES FOR AIRCRAFT STRUCTURAL ELEMENTS

Ruslan Borys

The subject matter of this article is the technological process of manufacturing extruded aluminum alloy profiles used in aircraft structures. The goal of the study is to summarize the technological features of manufacturing such

profiles and to determine the primary factors affecting their dimensional accuracy, surface quality, structural uniformity and performance properties. The tasks addressed are to analyze the main stages of the technological route, determine the influence of billet temperature, extrusion speed, deformation ratio, tool geometry, friction conditions and heat treatment regimes, to systematize typical defects and propose a generalized quality assurance scheme. The methods used include an analytical generalization of scientific and technical sources, comparative analysis of technological factors and systematization of cause-and-effect relationships between process parameters and product quality. The results show that the quality of an extruded profile is formed by the combined influence of all stages along the manufacturing route, from billet preparation and homogenization to extrusion, cooling, straightening, aging and final inspection. The scientific novelty lies in the systematization of technological factors governing the production of aluminum alloy profiles from the standpoint of aircraft production requirements. Conclusions. The proposed approach enables consideration of the profile as a responsible semi-finished product whose properties are formed throughout the manufacturing process and can be used to develop manufacturing routes for aircraft structural elements.

Keywords: aluminum alloys; aircraft structures; profile extrusion; technological process; heat treatment; surface quality; dimensional accuracy; manufacturability.

Борис Руслан Степанович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна.

Ruslan Borys – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Technology of Aircraft Production, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: ruslanborys84@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4098-1013.