

Уніфікація технологічного оснащення при виготовленні профільних деталей із композитів для підвищення якості виробів авіаційно-космічної техніки

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”*

Конструкції із композиційних матеріалів широко використовуються у сучасній транспортній техніці. Цим матеріалам, наряду з низкою позитивних властивостей, властива і значна шкідлива технологічна спадковість. Вона проявляється у вигляді достатньо великих жолоблень, закручування виготовлених деталей. У першу чергу це відноситься до тонкостінних профільних деталей.

До таких деталей та виробів пред'являються жорсткі вимоги за масою, міцністю та жорсткістю, а також за мінімальними строками та витратами на технологічну підготовку виробництва. Виконати ці вимоги можливо, використовуючи принципи уніфікації.

В роботі розглянуто можливість реалізації принципів уніфікації на двох типових прикладах: виготовленні профільних виробів з композитів, які складаються з уніфікованих елементів різного перерізу, а також можливість групового (одночасного) виготовлення профільних виробів різного перерізу та довжини.

Сучасні пултрузійні машини широко використовуються для виготовлення таких односпрямованих (з армуванням під кутом нуль градусів – тобто вздовж деталі) деталей, як полиці лонжеронів, нервюр, стрингерів, ребер жорсткості та інші. Проаналізовано технологічні можливості різних моделей пултрузійних машин для виготовлення довговимірних композитних виробів. Порівняння проводилося за попередньо розрахованими питомими характеристиками цих машин.

При використанні запропонованих варіантів уніфікації витрати часу на технологічний процес може збільшуватися (для профілів достатньо складного перерізу), але суттєво знижуються витрати часу та витрата ресурсів на підготовку виробництва (до 1,5...3,0 разів).

Загалом, запропоновані заходи дозволяють знизити рівень залишкових напружень, рівень енерговитрат, підвищити ступінь технологічності виробництва та скоротити терміни технологічної підготовки виробництва.

Ключові слова: тонкостінні профільні деталі, композитні матеріали, уніфікація, конструювання перерізів профілів, технологічне оснащення, пултрузія, намотка, викладка.

Вступ

У сучасних конструкціях авіаційно-космічної техніки та безпілотних апаратах різних типів широко використовуються профілі та інтегровані панелі з композиційних матеріалів (КМ) різної форми перерізу. Основними технічними вимогами до них є мінімальна маса при визначеному рівні міцності, жорсткості та високій якості самої конструкції та процесів її виготовлення.

Комплексна якість конструкції визначається якістю конструктивно-технологічних рішень, процесів виготовлення та технологічного оснащення. В залежності від цілей виробництва до названих вимог додаються вимоги мінімальних витрат усіх видів ресурсів, часу конструктивного виготовлення та технологічної підготовки виробництва. Цим вимогам повинні відповідати властивості усіх елементів та процесів виробництва.

Серед властивостей, що визначають якість продукції, слід виділяти

властивість уніфікації. Ця властивість визначає зниження витрат та часу усіх видів.

Мета дослідження. Аналіз можливості та оцінка рівня уніфікації профільних деталей з КМ для підвищення якості конструкцій і виробництва. Якість конструкції забезпечується зниженням остаточних напружень (температурних та усадкових). Якість виробництва багато у чому визначається також фінансовими, ресурсними та часовими витратами усіх видів.

Можливість реалізації уніфікації та оцінка її рівня показано на двох прикладах.

Формоутворення профілів складного перерізу з мінімальним жолобленням з уніфікованих елементів.

Після формоутворення профілів несиметричних форм під дією остаточних напружень, що виникають після затвердження, виникає жолоблення профілів. Воно проявляється у вигляді згину та закручування перерізів вздовж довжини профілю. При силовому складанні конструкції у місцях кріплення профілів виникають сили, які погіршують несучу здатність профілю. Тому приходится компенсувати остаточні напруження шляхом утворення профілів симетричної форми. Такі форми, або близькі до них, розглядаються далі.

Викладений вище аналіз показав, що використання принципу уніфікації форм дозволяє суттєво покращити комплексну якість профільних деталей за рядом показників.

Прийняті припущення

При розробці конструктивно-технологічних рішень умовно приймалося, що:

- профільні вироби є тонкостінними, для яких використовуються відповідні підходи та залежності механіки матеріалів;
- при визначенні напрямків та величини згинання та закручування враховувалися тільки зусилля внаслідок нагрівання (температурні);
- усадкові деформації не враховувалися;
- деформації оснащення для формування, що виникають при нагріванні та охолодженні не враховувалися.

Методи дослідження

При виборі пропозицій щодо уніфікації використовувалася вартісно-функціональний метод та методи комп'ютерного інтегрованого проектування композитних конструкцій.

Згідно з традиційним підходом до розробки технології застосування процедури уніфікації призводить до підвищення якості виробів і конструкцій за рахунок підвищення їх технологічності та економічної ефективності. Як передбачено ГОСТ 23945.0-80 процес уніфікації означає приведення властивостей виробів до унікальних на основі раціонально підібраних типів їх множинності. Конструктивне застосування уніфікованих виробів скорочує кількість конструкторської документації до 2...3 разів, тривалість виробничого циклу до 1,5...2,0 разів і кількість випробувань [1]. Уніфікація розмірів конструктивних елементів гарантує зменшення кількості виробничого оснащення

або підвищує рівень промислової доступності при тій же його кількості.

Уніфікація – це комплексний процес, що має наслідки проектної підготовки виготовлення як впровадження однотипних елементів виробів, однакових виробів і вузлів, способів їх складання (стикування) і технологічної підготовки виготовлення, як застосування однотипних технологічних процесів, виробничих пристосувань і методів тестування.

Після отримання позитивних результатів уніфікації набору однотипних виробів інженери можуть зробити наступний крок до стандартизації окремих елементів всього виробничого середовища, підготовки виробництва та точного виробничого циклу.

Для оцінки ступеня уніфікації, що впливає на підвищення якості композиційних виробів, необхідно проаналізувати часові залежності досліджуваних параметрів. Одним із шляхів аналізу є застосування теорії великих технічних систем (ВТС). Розгляд функціонування ВТС показує, що найбільш придатною часовою функцією є експоненціальна з додатним чи від'ємним ступенем [1]. Наприклад, джерело [2] рекомендує наступну залежність для оцінки витрат на розробку нових статей як функцію часу t :

$$C_i = A_i t^{\alpha_i} e^{-\beta_i t},$$

де C_i – це витрати, що відповідають i -му періоду часу початку розвитку i -го етапу виробництва;

A_i , α_i , β_i – статистичні коефіцієнти i -го етапу розробки нового виробу.

Час t у цій формулі враховується у відносному вигляді ($0 < t \leq 1$).

Подібна залежність повністю відповідає реалізованій фізичній моделі і використовується в роботі [3] для кількісної оцінки якості в процесі виробництва. У цьому випадку A_i , α_i , β_i – статистичні коефіцієнти, які відповідають i -му етапу виробництва.

Указана залежність має два характерних ділянки:

- при малих значеннях часу t функція зростає;
- при великих значеннях часу t функція падає.

У застосуванні до функціонування промислових систем можна вважати, що зростаюча ділянка функції відповідає етапам підготовки виробництва, а спадна ділянка – етапам великосерійного виробництва. Це припущення відповідає логіці аналізу, наведеному в роботі [2]. Звідси випливає, що збільшення обсягів великосерійного виробництва за рахунок уніфікації призводить до зниження виробничих витрат. Тому застосування уніфікації в різних галузях виробництва є досить необхідним і критичним.

Розглянемо два приклади можливої уніфікації різних елементів виготовлення композиційних виробів.

1. Виготовлення профільних виробів з уніфікованих елементів (рис. 1). Цей рисунок демонструє, що широко поширені в техніці двотавровий профіль (при необхідності полиці або стінка профілю може бути посилені накладками), Т-подібний, П-подібний, Z-подібний та інші профілі можуть бути виготовлені шляхом клейового з'єднання квадратного (прямокутного) перерізу, який спочатку виготовляється пулпрузією, намотуванням або укладанням, а потім розрізається вздовж певних площин.

Можна спостерігати явище залишкових напружень, які виникають при розрізанні профілю. Напруження, що виникають при виготовленні оригінального

профілю, призводять до жолоблення (складного вигину і закручування) вирізаних елементів профілю. Центри жорсткості (ЦЖ) показані жирними крапками. Зміщення центрів жорсткості при з'єднанні елементів показано стрілками. На рис. 1 показані можливі форми елементів відходів після розрізання, які можуть бути використані як армувальні елементи (якщо підходить послідовність укладання волокон елемента з'єднання) або як допоміжні кришки чи ребра при складанні агрегату.

Вихідний переріз квадратної або іншої форми можна вважати синтетичним виробом (штучно виготовленим) або блоком, оскільки він служить напівфабрикатом для створення необхідних кінцевих перерізів.

Виготовлення синтетичного виробу може бути організовано будь-яким допустимим способом, але в першу чергу дизайнер повинен звернути увагу на метод пултрузії. Цей процес приваблює своєю високою технологічністю. Сучасні пултрузійні машини [4-6] (табл. 1) гарантують швидкість проходження кінцевої ділянки від 0,06 до 2,5 м/хв. В основному пултрузія використовується для отримання виробів з кутом армування 0° (тобто усі волокна спрямовані уздовж довжини виробу). Рідше використовуються кути, що відрізняються від 0° (можуть варіюватися до 45°).

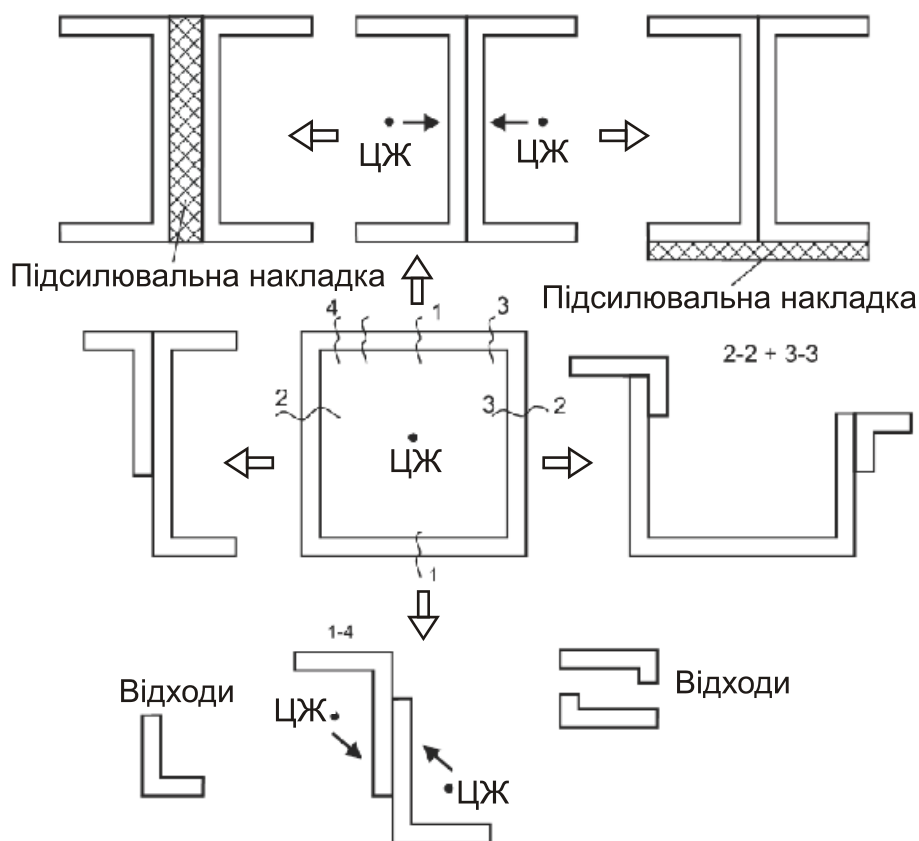


Рис. 1. Схема складання секцій з єдиних елементів, виготовлених з вихідного квадратного (прямокутного) профілю. Хвилястою лінією показані січні площини, цифрами означені варіанти сегментації та складені складні перерізи, "ЦЖ" означає центр жорсткості після розрізу, стрілки показують зміщення центру жорсткості після склеювання

Підсилювальні елементи з армуванням 0° широко застосовуються для виготовлення стрингерів і полиць лонжеронів.

Пултрузія може бути використана практично для будь-яких різноманітних армувальних елементів і сполучних.

Незважаючи на відносно велике значення питомих енерговитрат на виготовлення 1 м готового профілю (середнє значення близько 8,64 МДж/м), можна сказати, що пултрузія є маловитратним способом виготовлення в порівнянні з намотуванням і укладанням. Цей висновок ґрунтується на твердженнях про те, що нагрівання та затвердіння в'язучого відбуваються в обмеженому за розмірами об'ємі при постійній швидкості проходження кінцевого продукту.

Коефіцієнт матеріалоемності пултрузії максимальний у порівнянні з намотуванням і укладанням. Відходи матеріалу при різанні профілів складають 3..5%.

Основними недоліками пултрузійного методу виготовлення синтетичних виробів є неможливість (або дуже висока складність) виготовлення профілів зі змінним поперечним перерізом по довжині та змінною товщиною полиць та стінки профілю.

Таблиця 1

Характеристики пултрузійних машин [4-6]

Характеристики	Model						
	PMC 09-0806	PMC 30-4012	Px250-3T	Px1400-24T	Pulfor e Lab 0804-5000	BLG-8015	ZSC-12T
Максимальні розміри перерізу, що виготовляється, мм	200×150	1000×300	250×125	1400×350	200×100	250×180	200×250
Розміри машини (довжина×ширина), м	12×0.8	16,6×1,75	–	–	–	–	2,1×0.9
Вага, т	5,5	8,2	–	–	–	6,5	7,2
Зусилля протягування, т	9,0	30,0	9,4	44,0...67,0	0,5...5,0	15,0	10...13
Довжина зони обтискання, м	0,1	0,2	0,66	0,66	–	0,3	0,2...0,4
Швидкість протягування, м/хв	0,15...2,0	0,15...2,0	0,04...5,0	0,06...2,0	0,3	0,1...1,5	0,1...2,5
Кількість зон нагрівання	–	–	2	8	3	–	2
Потужність, кВт	–	–	15	40	–	8	18
Вартість, тис. дол.	20	33	10...25	1600	40	20	22
Питома витрата енергії, МДж/м	–	–	0,18...22,5	0,12...30,0	–	0,32...4,8	0,43...10,8

Універсальні цулаги та притискні елементи зазвичай використовуються для складання кінцевої частини нарізаних частин синтетичного виробу. Технологічність згаданого оснащення порівняно невисока, до того ж такі інструменти досить універсальні і вартість їх виготовлення розподілена по всій номенклатурі вироблених виробів. Тому при аналізі собівартості статті включенням цієї статті до всіх видатних відомостей можна знехтувати.

Трудомісткість виготовлення профільних виробів зазвичай складається з наступних компонентів:

- трудомісткість виготовлення синтетичного виробу, який поділяється на певну кількість елементів;
- трудомісткість різання та обробки крайок;
- обробка поверхонь, що з'єднуються, для склеювання, нанесення клейкої плівки або іншого з'єднувального матеріалу;
- стискання з'єднувальних поверхонь;
- термічна обробка адгезійного з'єднання;
- розбирання оснащення.

Трудомісткість вищевказаних операцій можна оцінити за відомими залежностями. Зазвичай значення загальної трудомісткості є меншим, ніж розраховане для вузлів і деталей, вироблених у процесі укладання.

Щодо несучої здатності вищевказаних виробів можна зробити висновок, що вона може бути покращена при необхідності шляхом застосування допоміжних накладок, встановлених на полицю або стінку та виготовлених таким же способом і з'єднаних аналогічними клейовими або механічними з'єднаннями.

2. Реалізація уніфікаційного підходу при груповому виготовленні профільних виробів.

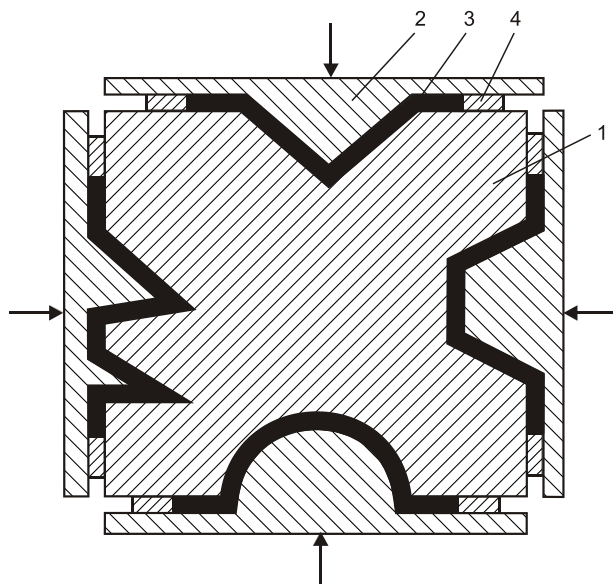


Рис. 2. Схема розташування чотирьох деталей на поверхнях матриці для викладки на наступній гарячій полімеризації: 1 – матриці; 2 – цулага (для притискування); 3 – виріб, що формується; 4 – проміжний елемент. Стрілками показано дію стискального зусилля

Основна суть цього підходу показана на рис. 2. Конструкція 1 форми прямокутника має чотири порожнини, що задають форми виробів. Препрег 3

укладається в кожну порожнину. У даному випадку чотири вироби з різним перерізом розташовані на кожній грані. Укладання проводиться в порожнину, розташовану горизонтально. Укладений вологий композитний пакет стискається відповідною геометричною фіксуючою пластиною 2, що підтримується прокладками 4. Потім матриця обертається на 90° та процес викладення продовжується та викладаються ще два вироби.

Наступний крок включає в себе підготовчі операції для полімеризації композитного пакету та подачу його в автоклав. Як правило, процес полімеризації відбувається при складному температурно-часовому режимі [7] (приклад для сполучного 5-211БН):

– нагрівання до $100 \pm 5^\circ\text{C}$ зі швидкістю $0,5 \dots 1,5^\circ\text{C/хв}$ та тиску $0,7 \dots 0,9$ атм. (вакуумування);

– підйом тиску до $2 \dots 3$ атм (вакуум видаляється), підйом температури до $125 \pm 5^\circ\text{C}$;

– витримка for $2 \dots 4$ год;

– зниження температури до $40 \dots 60^\circ\text{C}$ зі швидкістю $1 \dots 2^\circ\text{C/хв}$, витримка;

– зниження температури до кімнатної (20°C).

Загалом цей етап займає $5 \dots 9$ годин, а автоклав споживає номінальну потужність для надзвичайно тривалого циклу затвердіння (приблизно 4 години), щоб гарантувати необхідну температуру та тиск.

Характеристики автоклавів, що використовуються для авіаційної та цивільної промисловості, наведені в таблицях 2 і 3 [8, 9].

Таблиця 2

Характеристики автоклавів для полімеризації композитних виробів, що використовуються у аерокосмічній, автомобільній та кораблебудівній, енергетичній та спортивній галузях промисловості

Модель	SN-BGF2650	SN-CGF1530	Maganabosco	EC1.2MX2.4	EC18X60
Розміри (довжина×діаметр), м	5,0×2,3	3,0×1,5	0,75×0,44	2,4×1,22	18,3×5,5
Максимальна температура, °C (повітря)	160	250	200	200	200
Максимальний тиск (більше атмосферного), МПа	1,5	1,6...10	0,8	3...4	3...5
Вартість, тис. дол.	100	125...255	65...85	30...50	50...70
Вага, т	15	6,7	6,8	8,5	30,8
Потужність, кВт	135	60	9,0	50...70	120...150

* Максимальна температура у автоклаві досягає 800°C ; максимальний тиск – 20 МПа

Відносно низька швидкість підвищення температури визначається в основному потребою у видаленні летючих речовин з пакету композиту упаковки на початку затвердіння. Для цього проводиться нагрівання при низькому тиску і високій теплоємності конструкції оснащення. Низька швидкість охолодження визначається в основному одним і тим же параметром – теплоємністю

оснащення і раціонально підібраним діапазоном допустимої термічної деформації виробу.

Таблиця 3

Питомі характеристики автоклавів, які представлено у табл. 2

Модель	SN-BGF2650	SN-CGF1530	Maganabosco	EC1.2MX2.4	EC18X60
Характеристика 1, кВт/м ²	11,74	13,33	27,27	17,06...23,9	1,19...1,49
Характеристика 2, (кВт·г)/м ²	35,2	40,0	81,8	51,2...71,7	3,6...4,5

Примітки: Характеристика 1 – Відносна потужність (номінальна потужність віднесена до площі перерізу автоклаву); Характеристика 2 – Відносне споживання енергії для умов полімеризації з використанням 75% номінальної потужності на протязі 4 годин.

Аналіз таблиць 2 і 3 показує, що енерговитрати досить значні при виготовленні фасонних виробів. Ці витрати можуть досягти 70...80 кВт·г/м² у операційній зоні автоклаву. Щоб зменшити енергоспоживання, об'єм автоклава повинен бути максимально заповнений. Цього можна досягти за допомогою багатомісного розміщення виробів на гранях комбінованого оснащення.

Висновки

Наведені приклади принципу уніфікації, оскільки виготовлення синтетичного виробу (вузла) з послідовним вирізанням елементів і створенням форм необхідного перерізу та здійснення групового виробництва профільних виробів, дозволяють реалізувати:

- зниження трудомісткості створення необхідної форми в 1,5...3 рази та зниження вартості виготовлення складних заготовок;
- зниження рівня залишкових напружень за рахунок їх часткової компенсації при складанні окремих елементів;
- зменшення енерговитрат при затвердінні в декілька разів (у наведеному прикладі до 4 разів);
- підвищення рівня технологічності виробництва;
- скорочення термінів технологічної підготовки виробництва при виготовленні модифікованих виробів за рахунок застосування попередньо виготовленого (універсального) технологічного оснащення, попередньо розроблених і апробованих технологічних процесів виготовлення та випробувань.

Список літератури

1. Кононенко, В. Г. Оценка технологичности и унификации машин / В. Г. Кононенко В. Г., Кушнарченко С. Г., Прялин М. А. // – М. : Машиностроение, 1986. – 160 с.
2. Саркисян, С. А. Анализ и прогноз развития больших технологических систем / С. А. Саркисян, В. М. Ахундов, Э. С. Минаев // – М. : Наука, 1982. – 278 с.
3. Тараненко, М. Е. Квалиметрия в листовой штамповке : учебник / М. Е. Тараненко // – Х., Нац. аерокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». 2015. – 133 с.

4. Karpichev, V. Modeling of technological processes of machine-building and repair manufacture / V. Karpichev, K. Sergeev, A. Bolotina // Journal: Communication, 4/2019, Vol. 21, P. 59-62, <https://doi.org/10.26552/com>. – 2019. С. – 4.59-62.
5. Structural pultrusions. [Електронний ресурс] <http://www.libertypultrusions.com/technical-data> (22.04.2024).
6. Energy and Sustainability Topics – Site Cost Review. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <https://tangram.co.uk/wp-content/uploads/Energy-and-Sustainability-Topics-Site-Cost-Review.pdf> (22.04.2024).
7. Pultrusion process for composite materials. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <https://pultrex.com/pultrusion-process> (22.04.2024).
8. Andreev O.V. The concept of manufacturing engineering support of development of efficient polymer composite structures for locally produced civil aircraft in present-day conditions / A.V. Andreev, V.E. Gaidachuk, A.V. Kondratiev, O.V. Orlov // Aerospace Engineering and Technology. – No.3 (138), 2017. – pp. 64-76, DOI: 10.18372/2306-1472.81.14596.
9. Upadhy A. Autoclaves for Aerospace Applications: Issues and Challenges / A. R. Upadhy, G. N. Dayananda, G. M. Kamalakannan, J. Ramaswamy Setty, J. Christopher Daniel // International Journal of Aerospace Engineering. – Volume 2011, Article ID 985871, <https://doi.org/10.1155/2011/985871>.

References

1. Kononenko, V. G. Ocenka tehnologichnosti i unifikacii mashin / V. G. Kononenko V. G., Kushnarenko S. G., Pryalin M. A. // . – M. : Mashinostroenie, 1986. – 160 s.
2. Sarkisyan, S. A. Analiz i prognoz razvitiya bolshih tehnologicheskikh sistem / S. A. Sarkisyan, V. M. Ahundov, E. S. Minaev // M. : Nauka, 1982. – 278 s.
3. Taranenko, M. E. Kvalimetriya v listovoj shtampovke : uchebnik / M. E. Taranenko // H., Nac. aerokosmich. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Hark. aviac. in-t». 2015. – 133 s.
4. Karpichev, V. Modeling of technological processes of machine-building and repair manufacture / V. Karpichev, K. Sergeev, A. Bolotina // Journal: Communication, 4/2019, Vol. 21, P. 59-62, <https://doi.org/10.26552/com>. – 2019. С. – 4.59-62.
5. Structural pultrusions. [Електронний ресурс] <http://www.libertypultrusions.com/technical-data> (22.04.2024).
6. Energy and Sustainability Topics – Site Cost Review. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <https://tangram.co.uk/wp-content/uploads/Energy-and-Sustainability-Topics-Site-Cost-Review.pdf> (22.04.2024).
7. Pultrusion process for composite materials. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <https://pultrex.com/pultrusion-process> (22.04.2024).
8. Andreev, O. V. The concept of manufacturing engineering support of development of efficient polymer composite structures for locally produced civil aircraft in present-day conditions / A. V. Andreev, V. E. Gaidachuk, A. V. Kondratiev, O. V. Orlov // Aerospace Engineering and Technology. – No.3 (138), 2017. – pp. 64-76, DOI: 10.18372/2306-1472.81.14596.
9. Upadhy, A. Autoclaves for Aerospace Applications: Issues and Challenges / A. R. Upadhy, G. N. Dayananda, G. M. Kamalakannan, J. Ramaswamy Setty, J. Christopher Daniel // International Journal of Aerospace Engineering. – Volume 2011, Article ID 985871, <https://doi.org/10.1155/2011/985871>.

Надійшла до редакції 21.12.2023, розглянута на редколегії 21.12.2023

Unification of technological equipment in the composite section production for improving quality of aerospace articles

Structures made of composite materials are widely used in modern transport equipment. These materials, along with a number of positive properties, are also characterized by significant harmful technological heredity. It manifests itself in the form of sufficiently large grooves, twisting of manufactured parts. First of all, this applies to thin-walled profile parts.

Such parts and products are subject to strict requirements in terms of mass, strength and rigidity, as well as minimum deadlines and costs for technological preparation of production. It is possible to meet these requirements using the principles of unification.

The paper considers the possibility of implementing the principles of unification on two typical examples: the production of profile products from composites, which consist of unified elements of different cross-sections, as well as the possibility of group (simultaneous) production of profile products of different cross-sections and lengths.

Modern pultrusion machines are widely used for the production of such unidirectional (with reinforcement at an angle of zero degrees - i.e. along the article)) articles, such as caps of spars, ribs, stringers, stiffeners and others. The technological possibilities of various models of pultrusion machines for the production of long-dimensional composite products are analyzed. The comparison was made according to the previously calculated specific characteristics of these machines.

When using the proposed options for unification, the time spent on the technological process may increase (for profiles, a complex cross-section is enough), but the time spent and the consumption of resources for production preparation are significantly reduced (up to 1.5...3.0 times).

In general, the proposed measures make it possible to reduce the level of residual stresses, the level of energy consumption, increase the degree of manufacturability of production and shorten the terms of technological preparation of production.

Key words: thin-walled section articles, composite materials, unification, construction of profile sections, technological equipment, pultrusion, winding, laying-up.

Відомості про авторів:

Тараненко Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, професор каф. 403 “Композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства” Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, Україна, e-mail: igor.taranenko@khai.edu

About the Authors

Taranenko Igor – Ph.D., Associate professor of department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “KhAI”, Ukraine, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.