

УДК 621.45.032.3

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.09

А. В. БАЛАЛАЄВ¹, К. В. БАЛАЛАЄВА¹, А. А. КОВТУН²,
Г. Г. ГОЛЕМБІЄВСЬКИЙ¹, Г. М. НІКІТИНА¹

¹ Національний університет «Київський державний інститут», Київ, Україна

² Авіакомпанія «Роза вітрів», Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВИКЛАДКИ ПРЕПРЕГІВ НА КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХНЯХ НА ПРИКЛАДІ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА БПЛА

Об'єктом дослідження виступає композитний повітряний гвинт БПЛА з периферійним діаметром 400 мм. Предмет дослідження – моделювання викладки препрегу повітряного гвинта. **Метою** роботи є оцінка впливу урахування міжволоконних зсувних процесів при моделюванні викладки препрегів на криволінійних поверхнях на прикладі повітряного гвинта БПЛА в програмному середовищі Ansys. **Завдання:** 1. Моделювання обтікання повітряного гвинта в заданому діапазоні частот обертання з метою отримання розподіленого аеродинамічного навантаження на поверхні гвинта. 2. Моделювання механічних характеристик повітряного гвинта БПЛА та аналіз напружено-деформованого стану повітряного гвинта без урахування міжволоконних зсувних процесів. 3. Моделювання механічних характеристик повітряного гвинта БПЛА та аналіз напружено-деформованого стану повітряного гвинта з урахуванням міжволоконних зсувних процесів. У роботі застосовано комплексний чисельний **метод**, що поєднує аеродинамічне моделювання повітряного гвинта та скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану композитного повітряного гвинта. **Результати.** Порівняння результатів моделювання напружено-деформованого стану повітряного гвинта свідчить про відмінності в розподілі деформацій і напружень між моделями, побудованими з урахуванням і без урахування драпірування. Урахування міжволоконних зсувних процесів під час моделювання драпірування дає змогу оцінити вплив технології викладки препрегів на напружено-деформований стан композитної лопаті. На відміну від підходу з номінальною орієнтацією шарів, така постановка задачі враховує зміну напрямків армувальних волокон, що виникає в процесі формування композитної оболонки на поверхні складної геометричної форми. Це дозволяє проаналізувати, наскільки технологічно зумовлені відхилення орієнтації волокон впливають на розподіл жорсткості, деформацій та напружень у конструкції. Максимальні деформації та максимальні еквівалентні напруження дослідженого повітряного гвинта при різних підходах до моделювання відрізняються близько на 5–7 % і 4–5 %, відповідно. **Наукова новизна** полягає в тому, що отримані результати моделювання викладки препрегів на криволінійних поверхнях на прикладі повітряного гвинта БПЛА показало необхідність урахування технологічно зумовленої переорієнтації волокон при чисельному аналізі конструкції.

Ключові слова: препрег, драпірування, міжволоконний зсув, повітряний гвинт, максимальні деформації, максимальні еквівалентні напруження, математичне моделювання.

Вступ

В авіаційній, автомобільній, суднобудівній та інших галузях промисловості широко застосовуються деталі, виготовлені з композиційних матеріалів (КМ). Вони мають певні переваги у вазі та високих механічних властивостях. Дослідження властивостей композитних виробів, у тому числі складних форм з вигнутими поверхнями, є актуальною та складною задачею. Одним із найпоширеніших способів виготовлення деталей із КМ є викладка армувальних матеріалів на формуютьовальні поверхні (матриці). При виготовленні та моделюванні особливу складність становить формування деталей із КМ складної просторової геометрії з криволінійними поверхнями. Такі деталі, на відміну від пластин або циліндричних поверхонь, у місцях з криволінійністю

будуть мати локальні деформації, зсуви між нитками основи та утоку, зміну орієнтації армувальних волокон, утворення складок і зон концентрації напружень.

Розвиток сучасних методів розрахунку та моделювання властивостей і характеру поведінки виробів із композитів досяг великого прогресу. Серед таких програмних середовищ найбільше визнання мають програми Ansys, Abaqus, Comsol Multiphysics і багато інших. Моделювання процесу викладки препрегів дає можливість досліджувати процес драпірування та викладки композитних тканин на етапі виготовлення та технології виготовлення. Застосування методів моделювання викладки препрегів з урахуванням особливостей геометричних характеристик деталей дає можливість більш точно прогнозувати їх механічні властивості.



У роботах [1-2] представлено огляд робіт і основні питання, що виникають при дослідженні моделювання та урахування драпірування на криволінійних поверхнях виробів із КМ. В огляді літератури [1], присвяченій процесу формування текстильних армуючих матеріалів, розглядаються експериментальні випробування, характеристики формування та чисельні методи моделювання формування текстилю. Авторами підкреслюється, що зсув у площині є найбільш домінуючим механізмом при формуванні текстильних армуючих матеріалів з двомірної тканини в тривимірну заготовку, наприклад, коли тканина драпірується на поверхні подвійної кривизни. У роботі обговорюються передові чисельні методи до моделювання процесів формування, такі як використання твердотільних оболонкових елементів для моделювання драпірування текстилю та включення урахування жорсткості при згинанні в чисельні моделі. Автором роботи [2] показано, що формування композитів включає специфічні режими деформації, такі як зсувні деформації в площині та вигин, які дозволяють створювати форми подвійної кривизни. Обговорюється, що при формуванні композитів присутнє відносне ковзання волокон, на відміну від процесів формування металів. Розглядаються різні підходи до моделювання формування, включаючи кінематичні моделі (алгоритми «рибальської мережі»), драпірування текстильного армування на поверхнях подвійної кривизни.

Велика кількість публікацій присвячена експериментальним і чисельним дослідженням викладення препрегів на криволінійних поверхнях та деталях складної геометричної форми, вузлів із КМ [3-8, 1].

У статті [3] досліджується поведінка вуглецевого полотна при драпіруванні, що є проблемою в композитному рідинному формуванні через утворення складок на тканині та необхідність точного прогнозування утворення складок тканини. Авторами роботи проводиться як експериментальне, так і макроскопічне чисельне моделювання драпірування з використанням LS-DYNA/Explicit вирішувача та моделі матеріалу MAT REINFORCED THERMOPLASTIC, адаптованого для сухих тканин. Обговорюється, як драпірування відбувається при розміщенні тканини на тривимірних складних криволінійних формах і визначається низьким опором зсуву та вигину, що призводить до деформації ниток основи та утку.

У роботі [4] досліджується поведінка шарів тканого препрега, що розміщуються роботом на слабо вигнутій подвійній формі, та необхідність досягнення безшовної драпірованої конфігурації. Представлено віртуальне середовище драпірування (VDE), яке поєднує кінематичне та механічне моделювання

для планування та моделювання автоматизованого процесу драпірування з використанням нестационарної нелінійної скінченно-елементної моделі. У роботі розглядається зрушення (або шпалерна деформація), як найбільш важливий механізм деформації плоскої тканини на подвійній вигнутій формі, де жорсткість на кілька порядків нижче за жорсткість у напрямку волокон.

Авторами [5] представлено прогностичне віртуальне моделювання процесу з використанням дискретного мезоскопічного скінченно-елементного моделювання для вирішення проблеми утворення складок і змінних зсувів товщини в деталях зі складною кривизною. Застосовується формулювання оболонки розтягування за товщиною (SHELL ELFORM25) у поєднанні з моделлю матеріалу, що визначається користувачем, для обліку зсуву в площині, деформації по товщині та фрикційних взаємодій під час термоформування композитів з надвисокомолекулярного поліетилену (UHMWPE) з перехресним розташуванням шарів. Досліджується комбіноване вплив геометрії оснастки та стратегічно введених щілин, демонструючи, що щілини, орієнтовані по кутах, значно зменшують варіативність товщини та вираженість складок у термоформованих деталях.

У статті [6] аналізується драпірування текстильних композитних армуючих елементів на квадратній коробці, що є складним завданням для формування через її форму та потенційну можливість утворення складок. Використовується чисельне моделювання на основі скінченних елементів оболонки з результатами напруженнями для прогнозування утворення складок і визначення можливості драпірування, результати порівнюються з експериментальними спостереженнями. Досліджується, як характеристики розтягування, зсуву в площині та згинання текстильного армуючого елемента відображають малюнок плетіння та впливають на можливість драпірування композитних матеріалів.

У центрі уваги роботи [7] – скінченно-елементне моделювання текстильних композитів на основі континууму для моделювання деформації в процесі драпірування. Представлено неортогональну конститутивну модель, яка точно відстежує орієнтацію ниток визначення зсуву тканини та втягування матеріалу. Використовується модель, розроблена для Abaqus/Explicit, і підтверджується її точність порівняння з експериментальним укладанням на інструменті з подвійною кривизною.

Дослідження складної переорієнтації та перерозподілу волокон вуглецевих тканин простого переплетення при драпіруванні на матриці з подвійною кривизною за допомогою експериментальних і чисельних методів представлено в роботі [8]. Розглядаються питання отримання властивостей матеріалу за

допомогою випробувань на одновісне розтягування, розтяг під дією сили тяжіння та випробувань на «рамку для картини» для розробки анізотропної гіперпружної моделі для моделювання. Представлено моделювання процесу драпірування з використанням анізотропної гіперпружної моделі, що враховує нелінійність матеріалу та геометрії і має хорошу відповідність експериментальним результатам.

У роботі [9] представлено розроблений неортогональний конститутивний код VUMAT для моделювання драпірування з метою оцінки механічної поведінки та руйнування матеріалу затверджених драпірованих структур. Автори представляють результати моделювання локальної зсувної деформації тканини простого переплетення, драпірованої на напівсферичній структурі, точно прогножуючи кути зсуву в локальних областях, при цьому оцінюють деформаційну поведінку та руйнування матеріалу затверділої напівсфери під стисненням з урахуванням локальних змін властивостей, що виникають унаслідок процесу драпірування. У продовженні роботи [9] – роботі [10] – реалізовано методику моделювання драпірування, що відображає механічну поведінку незатверділих тканих препрегів, зокрема, з урахуванням характеристик вигину, з використанням конститутивного неортогонального коду VUMAT і моделі оболонки шарів. Авторами оцінюються драпірованість і якість утворення складок для складної геометрії, зокрема, для панелі типу «яєчна коробка», на основі початкової орієнтації драпірування, при цьому результати моделювання підтверджуються експериментально. Як результат наводяться механічні властивості незатверділих тканих препрегів за допомогою випробувань на одновісне розтягування, зсув у вигляді рамки та консольний вигин для точного моделювання драпірування.

Кінематичні моделі драпірування та оптимізація процесу драпірування представлені в роботах [11-13, 2]. Автори роботи [11] представляють багатопараметричний інструмент ремоделювання – зрізаний конус, розроблений для рівномірної ідентифікації базових поверхонь за допомогою 12 геометричних параметрів, пов'язаних з базою даних площинного зсуву та орієнтації ниток. У роботі представлено опис інструменту прогнозування драпірування, призначеного для швидкого дослідження безлічі сценаріїв драпірування в моделюванні з метою визначення найкращої стратегії для промислових неконструкційних аерокосмічних композитів зі складною геометрією. Обговорюється кінематичний алгоритм драпірування, який використовує окремі геометричні особливості, позначені як плоскі, з одинарною і подвійною кривизною, виявлені на поверхнях прес-форм, для об'єднання повної стратегії драпірування складних деталей, що часто вимагають площинного зсуву для забезпечення відповідності поверхні.

У роботі [12] представлено простий, заснований на кінематиці, код MATLAB та Python для моделювання та оптимізації драпірування поверхні форми з подвійною кривизною композитною тканиною. Показано результати розрахунку кінцевої орієнтації волокон після адаптації тканини до складної геометрії форми, що має вирішальне значення для структурного аналізу та технологічності виробництва. Також авторами обговорюються різні розширення, включаючи структуру для оптимізації параметрів драпірування з метою мінімізації кутів зсуву та покращення процесу виготовлення складних деталей.

У роботі [13] представлено заснований на оптимізації метод моделювання процесів формування тканих, армованих тканиною композитів, який включає як геометричні, так і механічні підходи до драпірування на складні геометричні форми. Обговорюється, як прогнозування кутових спотворень та змін орієнтації волокон під час драпірування є важливим для розуміння виробничого процесу та оцінки механічних властивостей композитних структур. Показано, що зсув тканини в площині, який призводить до зміни кута між нитками основи та утку, є основним способом деформації під час глибокої витяжки або драпірування тканинних матеріалів.

Таким чином, огляд наукових джерел показав, що при моделюванні процесів драпірування та викладки препрегів на поверхнях складної криволінійної форми суттєвий вплив на формування структури композиту мають міжволоконні зсувні деформації, які визначають зміну орієнтації волокон, можливість утворення складок і локальну неоднорідність властивостей матеріалу. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій галузі, питання впливу врахування міжволоконних зсувних процесів на результати моделювання реальних композитних конструкцій складної геометрії залишається актуальним. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування процесів формування деталей складної криволінійної форми та зменшення витрат на експериментальне відпрацювання технологічних процесів. В авіаційній галузі для БПЛА особливий інтерес становлять повітряні гвинти.

Метою роботи є оцінка впливу урахування міжволоконних зсувних процесів при моделюванні викладки препрегів на криволінійних поверхнях на прикладі повітряного гвинта БПЛА в програмному середовищі Ansys.

Завдання:

1. Моделювання обтікання повітряного гвинта в заданому діапазоні частот обертання з метою отримання розподіленого аеродинамічного навантаження на поверхні гвинта.

2. Моделювання механічних характеристик повітряного гвинта БПЛА та аналіз його напружено-деформованого стану без урахування міжволоконних зсувних процесів.

3. Моделювання механічних характеристик повітряного гвинта БПЛА та аналіз його напружено-деформованого стану з урахуванням міжволоконних зсувних процесів.

Постановка задач дослідження

Об'єктом дослідження є композитний гвинт БПЛА з периферійним діаметром 400 мм. Він виконаний (моделювався) з двох суцільних повздовжніх напівоболонок, що складаються з трьох шарів вуглецевого препрегу з однаковою викладкою. Центральна частина гвинта підсилена чотирма шарами подібної тканини зі змінними кутами армування, а саме 0/45/-45/90 градусів. Товщина одного шару 0,2 мм. Матеріал має пружні характеристики в залежності від зсуву в площини тканини основи відносно утка в діапазоні від 30 до -30 градусів. Тривимірну модель досліджуваного повітряного гвинта представлено на рис. 1.

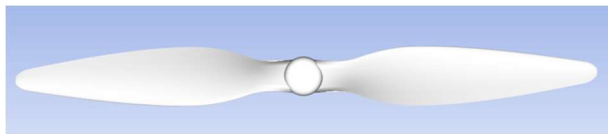


Рис. 1. Об'єкт дослідження

Для оцінювання впливу міжволоконних зсувних процесів на механічні характеристики композитного гвинта використано чисельне моделювання в програмному середовищі Ansys.

Дослідження виконувалось у два етапи. На першому етапі проводилось CFD моделювання обтікання повітряного гвинта при частоті обертання 4000 об/хв, 4500 об/хв, 5000 об/хв, 5500 об/хв та 6000 об/хв в модулі CFX. Результати моделювання (поле тиску) передавались у модуль Static Structural, де вже проводився розрахунок напружено-деформованого стану.

Властивості композиційного матеріалу та урахування або не урахування міжволоконних зсувних процесів на криволінійних поверхнях повітряного гвинта закладались в модулі ACP і передавались в модуль Static Structural.

Результати

Візуалізацію зміни товщини одного шару препрегу, сформованого по криволінійній поверхні пові-

тряного гвинта з урахуванням або без урахування міжволоконних зсувних процесів, представлено на рис. 2.

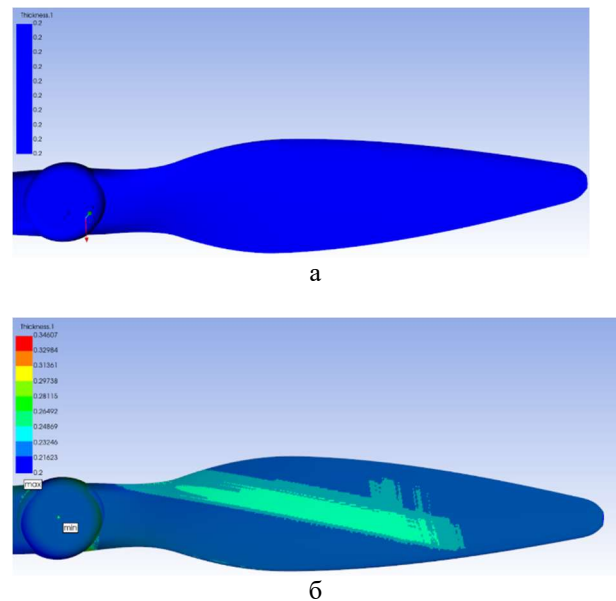


Рис. 2. Візуалізація зміни товщини одного шару препрегу, сформованого по криволінійній поверхні повітряного гвинта з урахуванням або без урахування міжволоконних зсувних процесів: а – без драпірування; б – з урахуванням драпірування

На рис. 3 зображено розподіл аеродинамічного навантаження на поверхні гвинта на основі результатів, отриманих в модулі CFX при аеродинамічному розрахунку. Також при розрахунку напружено-деформованого стану повітряного гвинта задавалась дія відцентрових сил у залежності від частоти обертання повітряного гвинта.

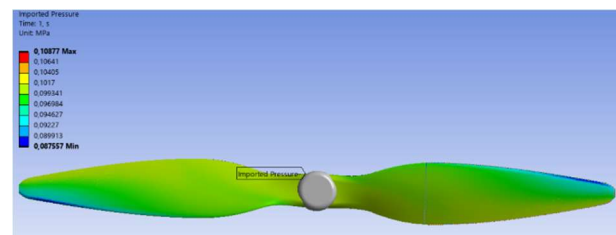


Рис. 3. Розподіл аеродинамічного навантаження на поверхні гвинта при частоті обертання 6000 об/хв

За результатами розрахунку отримано напруження та деформації в повітряному гвинті при різних режимах роботи. Для порівняння на рис.4-5 представлено розподіл деформацій і напружень у досліджуваному гвинті з урахуванням і без урахування драпірування.

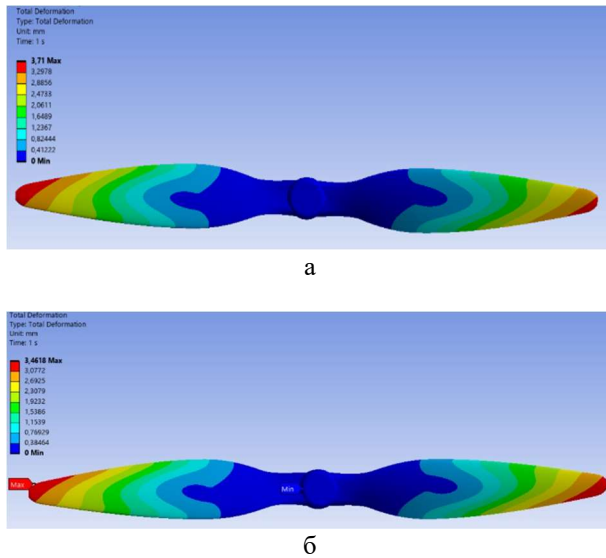


Рис. 4. Розподіл деформацій у досліджуваному гвинті при частоті обертання 6000 об/хв:
а – без драпірування; б – з урахуванням драпірування

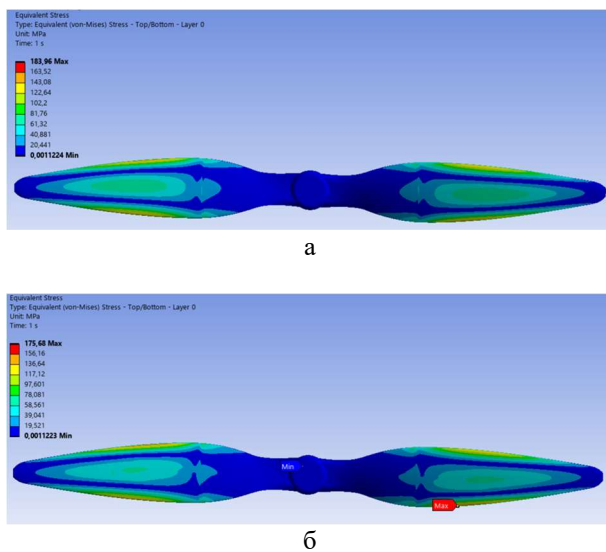


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень в досліджуваному гвинті при частоті обертання 6000 об/хв
а – без драпірування; б – з урахуванням драпірування

На графіках, представлених на рис. 6-7, показано залежність максимальних деформацій і максимальних еквівалентних напружень у діапазоні частоти обертання повітряного гвинта 4000...6000 об/хв з оцінкою впливу урахування міжволоконних зсувних процесів.

Порівняння результатів моделювання напружено-деформованого стану повітряного гвинта свідчить про відмінності в розподілі деформацій і напружень між моделями, побудованими з урахуванням і без урахування драпірування.

Залежності, наведені на рис. 6, показують, що зі збільшенням частоти обертання повітряного гвинта максимальні деформації лопаті монотонно зростають. Для моделі, що не враховує драпірування, максимальна деформація збільшується приблизно від 2,1 мм при 4000 об/хв до 3,7 мм при 6000 об/хв. Аналогічна тенденція спостерігається і для моделі з урахуванням драпірування, проте значення деформацій є дещо меншими та змінюються від 2,0 до 3,5 мм. Зниження максимальних деформацій становить близько 5–7 %, залежно від режиму роботи.

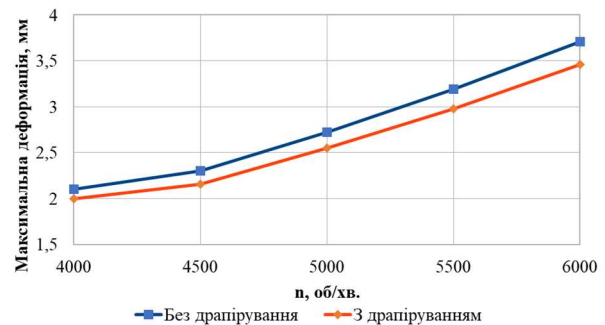


Рис.6. Залежність максимальних деформацій від частоти обертання повітряного гвинта

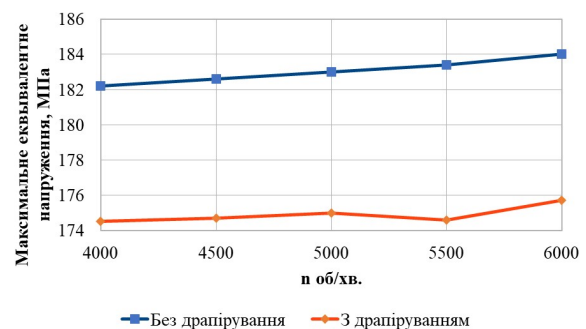


Рис.7. Залежність максимальних еквівалентних напружень від частоти обертання повітряного гвинта

З рис. 7 видно, що максимальні еквівалентні напруження також мають тенденцію до зростання зі збільшенням частоти обертання. Для моделі без урахування драпірування напруження збільшуються приблизно від 182 до 184 МПа, тоді як для моделі з урахуванням драпірування вони знаходяться в межах 174,5–175,8 МПа. Врахування міжволоконних зсувних процесів забезпечує зниження максимальних еквівалентних напружень на 4–5 % порівняно з традиційним підходом до моделювання. При цьому характер зміни напружень залишається практично однако-вим для обох варіантів розрахунку.

Урахування міжволоконних зсувних процесів під час моделювання драпірування дає змогу оцінити вплив технології викладки препрегів на напружено-

деформований стан композитної лопаті. На відміну від підходу з номінальною орієнтацією шарів, така постановка задачі враховує зміну напрямків армувальних волокон, що виникає в процесі формування композитної оболонки на поверхні складної геометричної форми. Це дозволяє проаналізувати, наскільки технологічно зумовлені відхилення орієнтації волокон впливають на розподіл жорсткості, деформацій і напружень у конструкції.

Висновки

Отримано оцінку впливу урахування міжволоконних зсувних процесів при моделюванні викладки препрегів на криволінійних поверхнях на прикладі повітряного гвинта БПЛА в програмному середовищі Ansys.

Моделювання драпірування дозволяє перейти від ідеалізованої схеми укладання шарів до аналізу конструкції з урахуванням технологічно зумовленого перерозподілу орієнтацій армувальних волокон. Це створює можливість кількісної оцінки впливу процесу виготовлення на механічну поведінку композитної лопаті вже на етапі проектування. Максимальні деформації та максимальні еквівалентні напруження дослідженого повітряного гвинта при різних підходах до моделювання відрізняються на 5–7 % та 4–5 % відповідно.

Напрямом подальших досліджень є урахування міжволоконних зсувних процесів при оцінці напружено-деформованого стану інших композитних конструкцій складної геометричної форми.

Внесок авторів: формулювання проблеми – А. В. Балаласв, К. В. Балаласва; концептуалізація дослідження – А. В. Балаласв, К. В. Балаласва, А. А. Ковтун, Г. Г. Голембієвський, Г. М. Нікітіна; огляд та аналіз інформаційних джерел – А. А. Ковтун, Г. Г. Голембієвський, Г. М. Нікітіна; моделювання обтікання повітряного гвинта – К. В. Балаласва, Г. М. Нікітіна; моделювання механічних характеристик повітряного гвинта – А. В. Балаласв; аналіз результатів та висновки – А. В. Балаласв, К. В. Балаласва; написання, редагування та доопрацювання рукопису – А. В. Балаласв, К. В. Балаласва, А. А. Ковтун, Г. Г. Голембієвський, Г. М. Нікітіна.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи для отримання результатів дослідження.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. *Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review* / T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner, C. Cherif // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2013. – Vol. 46. – P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.10.004>.
2. *Woven composites* ; ed. by M. H. Aliabadi. – London : Imperial College Press, 2015. – 248 p.
3. *Experimental and numerical investigation on draping behaviour of woven carbon fabric* / V. S. Balakrishnan, M. R. Yellur, J. J. Roesch et al. // *Journal of Industrial Textiles*. – 2022. – Vol. 51, iss. 3 (suppl.). – P. 3575S–3592S. DOI: <https://doi.org/10.1177/15280837211038850>.
4. *Krogh, C. Modeling the robotic manipulation of woven carbon fiber prepreg plies onto double curved molds: A path-dependent problem* / C. Krogh, J. A. Glud, J. Jakobsen // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – Vol. 53, iss. 15. – P. 2149–2164. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998318822722>.
5. *White, K. D. Application of a Discrete Finite Element Modeling Approach to Form a Near-Uniform Thickness Compound Curvature Composite Part* / K. D. White, J. A. Sherwood // *Materials Science Forum*. – 2026. – Vol. 1182. – P. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-C1cyX0>.
6. *Experimental and numerical analysis of textile composite draping on a square box. Influence of the weave pattern* / J. Huang, P. Boisse, N. Hamila et al. // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 267. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113844>.
7. *Implementation of a Non-Orthogonal Constitutive Model for the Finite Element Simulation of Textile Composite Draping* / R. S. Pierce, B. Falzon, M. C. Thompson, R. Boman // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 553. – P. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.553.76>.
8. *Draping of plain woven carbon fabrics over a double-curvature mold* / H. Yin, X. Peng, T. Du, Z. Guo // *Composites Science and Technology*. – 2014. – Vol. 92. – P. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.12.013>.

9. Han, M.-G. Draping simulation of carbon/epoxy plain weave fabrics with non-orthogonal constitutive model and material behavior analysis of the cured structure / M.-G. Han, S.-H. Chang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2018. – Vol. 110. – P. 172–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.04.022>.

10. Han, M.-G. Draping simulations of carbon/epoxy fabric prepreps using a non-orthogonal constitutive model considering bending behavior / M.-G. Han, S.-H. Chang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – Vol. 148. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106483>.

11. Hoffer, J. Development of a Draping Algorithm for Non-Structural Aerospace Composites : thesis / J. Hoffer. – Ottawa : University of Ottawa, 2020. – 237 p.

12. A simple MATLAB draping code for fiber-reinforced composites with application to optimization of manufacturing process parameters / C. Krogh, B.L.V. Bak, E. Lindgaard et al. // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2021. – Vol. 64. – P. 457–471. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02925-z>.

13. Cherouat, A. Numerical Tools for Composite Woven Fabric Preforming / A. Cherouat, H. Bourouchaki // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 2013, iss. 1. – 18 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/709495>.

References

1. Gereke, T., Döbrich, O., Hübner, M., Cherif, C. Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 46, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.10.004>.

2. Aliabadi, M. H. (ed.). *Woven composites*. Imperial College Press, London, 2015. 248 p.

3. Balakrishnan, S. V., Yellur, M. R., Roesch, J. J., Ulke-Winter, L., Seidlitz, H. Experimental and numerical investigation on draping behaviour of woven carbon fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, vol. 51, iss. 3 suppl, pp. 3575S–3592S. DOI: <https://doi.org/10.1177/15280837211038850>.

4. Krogh, C., Glud, J. A., Jakobsen, J. Modeling the robotic manipulation of woven carbon fiber prepreg plies onto double curved molds: A path-dependent problem. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, iss. 15, pp. 2149–2164. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998318822722>.

5. White, K. D., Sherwood, J. A. Application of a Discrete Finite Element Modeling Approach to Form a Near-Uniform Thickness Compound Curvature Composite Part. *Materials Science Forum*, 2026, vol. 1182, pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-C1cyX0>.

6. Huang, J., Boisse, P., Hamila, N., Gnaba, I., Soulat, D., Wang, P. Experimental and numerical analysis of textile composite draping on a square box. Influence of the weave pattern. *Composite Structures*, 2021, vol. 267. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113844>.

7. Pierce, R. S., Falzon, B., Thompson, M. C., Boman, R. Implementation of a Non-Orthogonal Constitutive Model for the Finite Element Simulation of Textile Composite Draping. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 553, pp. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.553.76>.

8. Yin, H., Peng, X., Du, T., Guo, Z. Draping of plain woven carbon fabrics over a double-curvature mold. *Composites Science and Technology*, 2014, vol. 92, pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.12.013>.

9. Han, M.-G., Chang, S.-H. Draping simulation of carbon/epoxy plain weave fabrics with non-orthogonal constitutive model and material behavior analysis of the cured structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 110, pp. 172–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.04.022>.

10. Han, M.-G., Chang, S.-H. Draping simulations of carbon/epoxy fabric prepreps using a non-orthogonal constitutive model considering bending behavior. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 148. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106483>.

11. Hoffer, J. Development of a Draping Algorithm for Non-Structural Aerospace Composites. *Master's thesis*, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 2020. 237 p.

12. Krogh, C., Bak, B. L. V., Lindgaard, E., Olesen, A. M., Hermansen, S. M., Broberg, P. H., Kepler, J. A., Lund, E., Jakobsen, J. A simple MATLAB draping code for fiber-reinforced composites with application to optimization of manufacturing process parameters. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, vol. 64, iss. 1, pp. 457–471. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02925-z>.

13. Cherouat, A., Bourouchaki, H. Numerical tools for composite woven fabric preforming. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/709495>.

Надійшла до редакції 17.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 03.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

SIMULATION OF PREPREG LAYOUT ON CURVILINEAR SURFACES USING THE EXAMPLE OF A UAV PROPELLER

A. Balalaiev, K. Balalaieva, A. Kovtun, G. Golembiyevskyy, H. Nikitina

The **study's object** is a composite UAV propeller with a peripheral diameter of 400 mm. The **study focuses on** modeling the propeller prepreg layout. The **aim** of the work is to evaluate the effect of accounting for interfiber shear processes when modeling prepreg layout on curved surfaces, using a UAV propeller as an example in the Ansys

software environment. **Tasks:** 1. Modeling the propeller streamlining in a given speed range in order to obtain a distributed aerodynamic load on the propeller surface. 2. Modeling the mechanical characteristics of the UAV propeller and analyzing the stress-strain state of the propeller without taking into account interfiber shear processes. 3. Modeling the mechanical characteristics of the UAV propeller and analyzing the stress-strain state of the propeller taking into account interfiber shear processes. The work employs a comprehensive numerical method that combines aerodynamic modeling of the propeller with finite element analysis of the composite propeller's stress-strain state. **Results.** A comparison of propeller stress-strain modeling results reveals differences in strain and stress distributions between models constructed with and without draping. Accounting for interfiber shear processes in draping models enables assessment of the impact of prepreg layup technology on the composite blade's stress-strain state. Unlike the nominal ply orientation approach, this formulation of the problem accounts for changes in reinforcing fiber direction that occur during composite shell formation on a complex geometric surface. This allows for an analysis of the impact of process-induced fiber orientation deviations on the stiffness, strain, and stress distribution within the structure. The maximum strains and maximum equivalent stresses for the studied propeller, calculated using different modeling approaches, differ by approximately 5–7% and 4–5%, respectively. The **novelty of the study** lies in the fact that the obtained results of prepreg layup modeling on curved surfaces, using the example of a UAV propeller, demonstrate the need to account for process-induced fiber reorientation in the numerical analysis of the structure.

Key words: prepreg, draping, interfiber shear, propeller, maximum deformations, maximum equivalent stresses, mathematical modeling.

Балалаєв Антон Валерійович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Балалаєва Катерина Вікторівна - доктор технічних наук, професор, професор кафедри електричної інженерії та енергомашинобудування, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Ковтун Артем Анатолійович – PhD, командир повітряного судна, Авіакомпанія «Роза вітрів», Київ, Україна

Голембієвський Григорій Григорійович – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Нікітіна Галина Миколаївна - старший викладач кафедри електричної інженерії та енергомашинобудування Аерокосмічного факультету, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Anton Balalaiev – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: avbalalaev@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3603-4512

Kateryna Balalaieva – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Electrical Engineering and Power Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: kiki_ua@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6495-3263,

Artem Kovtun – PhD, Aircraft Commander, Wind Rose Airlines, Kyiv, Ukraine, e-mail: 8274925@stud.nau.edu.ua, ORCID: 0009-0006-4327-8151,

Grygoriy Golembiyevskyy – Senior Lecturer, Aerospace Faculty, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: golembiyevsky.g@gmail.com, hryhorii.holembiievskyyi@npp.nau.edu.ua. ORCID: 0000-0003-2092-9637

Halina Nikitina – Senior Lecturer, Aerospace Faculty, Department of Electrical Engineering and Power Engineering, National University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: halyna.nikitina@npp.kai.edu.ua. ORCID: 0009-0006-1722-8142