

ВОЛОДИМИР МАРТИНЕНКО, ГЕННАДІЙ МАРТИНЕНКО

СТВОРЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ УДАРУ ПТАХА З ТИТАНОВИМИ АБО МЕТАЛ-МАТРИЧНИМИ ЛОПАТКАМИ ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНОГО ДВИГУНА

Невпинна еволюційна траєкторія сучасної комерційної авіації визначається одночасним прагненням до ефективності та легкості конструкції. Оскільки архітектура газотурбінних двигунів переходить до надвисокого ступеня двоконтурності для мінімізації питомої витрати палива та акустичних шумів, діаметр вентилятора неминує збільшуватися, що провокує «спіраль ваги», яка кидає виклик межах питомої міцності традиційних монолітичних титанових сплавів. Робота представляє комплексне теоретичне та обчислювальне дослідження конструкційної міцності лопаток з титанового сплаву, а також метал-матричного композиту на основі титанової матриці, зміцненого частинками карбиду кремнію, як кращої альтернативи для лопаток вентиляторів наступного покоління. Вирішуючи критичні вимоги льотної придатності щодо стійкості до зіткнення з птахами, розроблено високоточну чисельну модель, яка поєднує метод гідродинаміки згладжених частинок для птаха-ударника з явним нелінійним лагранжевим аналізом методом скінченних елементів. В роботі представлено вдосконалену стратегію визначального моделювання, яка синтезує в'язкопластичну модель Джонсона-Кука з законами еволюції анізотропного пошкодження, відкаліброваними для квазікрихкої механіки руйнування, характерної у тому числі для композитів, зміцнених дисперсними частинками. Крім того, ця робота безпосередньо інтегрує передові обчислювальні методології, включаючи еквівалентне динамічне навантаження для швидкого параметричного визначення розмірів та алгоритмічну динамічну релаксацію для демпфування паразитних коливань, щоб підвищити точність ініціалізації напружено-деформованого стану в деталях, що обертаються. Результати демонструють, що розрахункова модель підходить для оцінки міцності лопаток турбовентиляторного двигуна з метал-матричного композиту на основі титанової матриці.

Ключові слова: титанові матричні композити; явна динаміка; гідродинаміка згладжених частинок; газотурбінний двигун; лопатка вентилятора; модель Джонсона-Кука; обчислювальна механіка; конструкційна цілісність.

VOLODYMYR MARTYNENKO, GENNADIY MARTYNENKO

CREATION OF A COMPUTATIONAL MODEL OF BIRD STRIKE WITH TITANIUM OR METAL-MATRIX FAN BLADES OF A TURBO-FAN ENGINE

The relentless evolutionary trajectory of modern commercial aviation is driven by the simultaneous pursuit of efficiency and structural lightweighting. As gas turbine engine architectures transition toward ultra-high bypass ratios to minimize specific consumption and acoustic noise, fan diameters inevitably increase. This triggers a «weight spiral» that challenges the specific strength limits of traditional monolithic titanium alloys. This work presents a comprehensive theoretical and computational investigation of the structural strength of titanium alloy blades, as well as a titanium-based metal-matrix composite reinforced with silicon carbide particles, proposing the latter as a superior alternative for next-generation fan blades. Addressing critical airworthiness requirements regarding bird strike resistance, a high-fidelity numerical model was developed. This model couples the smoothed particle hydrodynamics method for the bird impactor with an explicit nonlinear Lagrangian finite element analysis. The study introduces an advanced constitutive modeling strategy that synthesizes the Johnson-Cook viscoplastic model with anisotropic damage evolution laws, calibrated for the quasi-brittle fracture mechanics characteristic of particle-reinforced composites. Furthermore, this work directly integrates advanced computational methodologies, including equivalent dynamic loading for rapid parametric sizing and algorithmic dynamic relaxation for damping spurious oscillations, to enhance the accuracy of stress-strain state initialization in rotating components. The results demonstrate that the calculation model suits the strength of titanium-based metal-matrix composite blades of the turbofan jet engine.

Keywords: titanium matrix composites; explicit dynamics; smoothed particle hydrodynamics; gas turbine engine; fan blade; Johnson-Cook model; computational mechanics; structural integrity.

Вступ. Аеромеханічне проектування сучасного турбовентиляторного двигуна з високим ступенем двоконтурності являє собою вершину мультидисциплінарної оптимізації, узгоджуючи аеродинаміку, термодинаміку та механіку твердого деформівного тіла з суворими реаліями експлуатації [1]. Основний показник ефективності в цивільній авіаційній силовій установці – питома витрата палива – обернено пропорційний ступеню двоконтурності. За рахунок прискорення більшої маси повітря з меншою швидкістю реактивна ефективність максимізується. Цей термодинамічний імператив призвів до безпрецедентного збільшення діаметра вентилятора в сучасних та майбутніх архітектурах авіаційних силових установок.

Однак це геометричне масштабування вводить нелінійне збільшення маси. Відцентрові навантаження, що створюються лопатками вентилятора, масштабуються пропорційно квадрату швидкості обертання та лінійно радіусу центру мас. Відповідно, невелике збільшення ваги лопатки вимагає більш важкого корпусу (щоб утримати лопатку в разі її

відриву), важчого диска (щоб надійно тримати лопатки) і важчого валу низького тиску (щоб передавати крутний момент). Цей каскадний ефект, відомий у галузі як «спіраль ваги», визначає, що матеріал лопаток вентилятора є критичною точкою впливу на вагову ефективність всього двигуна в цілому [2].

Понад чотири десятиліття матеріалом вибору в індустрії був титановий сплав Ti-6Al-4V. Його виняткова питома міцність, стійкість до мало- та багатоциклової втоми, а також висока корозійна стійкість зробили його галузевим стандартом. Проте, зі збільшенням діаметрів вентиляторів густина титану стає обмежувальним фактором. Відцентрові напруження в кореневому перерізі лопатки починають перевищувати межу плинності матеріалу, а власні частоти лопатки небезпечно знижуються, створюючи ризик аеропружного флатера, якщо не пожегнутувати аеродинамічною ефективністю за допомогою бандажних полиць на середньому розмаху.

Щоб вийти з цього конструктивного глухого кута,

дослідники звертаються до титанових металоматричних композитів, зокрема титану, зміцненого частинками карбїду кремнію. За рахунок впровадження жорстких дисперсних частинок карбїду кремнію в титанову матрицю питома жорсткість може бути збільшена на 40%, зміщуючи власні частоти лопатки за межі робочого діапазону та дозволяючи створювати легкі, тонкі та високоефективні аеродинамічні профілі [3].

Хоча статичні та втомні властивості металоматричних композитів є надзвичайно привабливими, їх фактичне впровадження в експлуатацію безпосередньо залежить від здатності витримувати жорстке стохастичне середовище експлуатації, що супроводжується пошкодженнями сторонніми предметами [4]. З усіх типів зовнішніх впливів зіткнення з птахами є найбільш технічно складним та енергоємним розрахунковим випадком [5]. Зіткнення з птахом – це не просто контактний удар, а високоенергетична, мультифізична подія, що включає фізику ударних хвиль, надшвидку взаємодію рідини та конструкції, а також екстремальні швидкості деформації [6]. Стандартний птах, що вдаряється в кінець лопатки на злітних швидкостях, генерує кінетичну енергію, порівнянну з локалізованим вибухом. Взаємодія повністю регулюється гідродинамічною поведінкою тканин птаха, які течуть як стислива рідина під час удару через те, що ударний тиск значно перевищує межу міцності цих тканин на зсув [7].

Льотна придатність цих компонентів суворо регулюється міжнародними стандартами, такими як нормативні документи Європейського агентства з безпеки авіації та Федеральні авіаційні правила США. Ці жорсткі норми вимагають, щоб двигун витримував потрапляння як одиночних великих птахів, так і зграй дрібніших птахів без катастрофічних наслідків (наприклад, нелокалізованого викиду уламків), виникнення пожежі або втрати здатності безпечно зупинитися [8]. Історично відповідність цим вимогам доводилася шляхом руйнівних та фінансово обтяжливих «блокових тестів» – пострілів тушками справжніх птахів у працюючі повнорозмірні двигуни або еквівалентні аналоги [9]. Ці тести надзвичайно дорогі і пропонують дуже обмежені об'єктивні дані про механіку внутрішнього напружено-деформованого стану та еволюцію руйнування [10].

Із запровадженням нових матеріалів з квазікрихким характером руйнування, таких як металоматричні композити, ризик невдалого проходження натурального тесту значно зростає. Тому сучасна аерокосмічна галузь активно переходить до концепції «Сертифікації за допомогою аналізу» – парадигми, де перевірені високоточні чисельні моделі замінюють частину фізичних випробувань. Цей перехід вимагає розробки методологій чисельного моделювання безпрецедентної точності, детальному опису однієї з яких присвячена дана робота.

1. Методи моделювання удару птахів об лопатки ТВД. Дослідження впливу ударів птахів на елементи авіаційних конструкцій формує масштабний пласт наукової літератури, що стрімко еволюціонує разом із розвитком методів обчислювальної механіки. За даними масштабного систематичного огляду [11], незважаючи на вдосконалення систем відлякування, частота зіткнень цивільних літаків з птахами продовжує зростати через розширення глобальних популяцій певних видів та збільшення інтенсивності авіаперевезень. Як зазначають у роботах [12-13], саме турбовентиляторні двигуни залишаються найбільш вразливими до зіткнень, оскільки їхня фронтальна площа є найбільшою серед критичних зон повітряного судна, а кінетична енергія удару сумується зі швидкістю обертання вентилятора.

Історично моделювання зіткнення з птахом становило класичну «дилему Лагранжа». У традиційному методі скінченних елементів сітка рухається разом з матеріалом, що ідеально підходить для опису жорстких конструкцій. Проте, коли птах як м'яке тіло вдаряється об лопатку на швидкості понад 100 м/с, він зазнає екстремальної деформації, розтікаючись подібно до рідини. У лагранжевій сітці це викликає сплутування елементів, утворення негативних об'ємів та передчасну зупинку вирішувача. Як детально продемонстровано у [5], штучне видалення (ерозія) сильно деформованих елементів птаха призводить до неконсервативної недооцінки імпульсу удару, оскільки маса та енергія штучно вилучаються з розрахункової системи.

Для вирішення цієї проблеми ранні дослідження використовували довільний лагранжево-ейлерів підхід, однак він стикався з труднощами у відстеженні вільної поверхні при фрагментації біологічного матеріалу та вимагав надмірних обчислювальних ресурсів [14]. Справжня зміна парадигми відбулася з переходом на повністю безсіткові методи, домінуючим серед яких стала гідродинаміка згладжених частинок (Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH) [15]. У огляді [16] представлено вичерпний аналіз застосування гібридного методу SPH-FEM для аналізу удару птаха по композитних панелях, підкресливши, що SPH найбільш точно відтворює гідродинамічну поведінку птаха, тоді як FEM найкраще підходить для захоплення механізмів руйнування мішені. Запропоновано інноваційні поєднані моделі для розв'язання проблем взаємодії рідини та твердого тіла, які доводять математичну стабільність SPH при високих швидкостях [17]. Праці [18, 19] верифікували моделі птахів SPH при великих швидкостях удару, продемонструвавши їхню високу точність у порівнянні з експериментальними даними пневматичних гармат.

Застосування SPH безпосередньо до лопаток вентилятора ТВД активно розвивається. Дослідження [20, 21] виявили ключові особливості моделювання динамічного впливу птаха на лопатки ТВД на робочих режимах. Важливість точного визначення динамічних характеристик роторів після зіткнення підтверджується фундаментальними роботами з

динаміки роторів щодо ідентифікації обчислювальних моделей складних роторних систем [22]. Окрім того, глибоке розуміння параметричного аналізу динаміки та міцності вентиляторів було розширено в дослідженнях статичної та динамічної міцності з урахуванням складних аеродинамічних властивостей потоку та неоднорідності температурного поля [23, 24]. Доведено ефективність параметричного чисельного аналізу відновлювальних сил у магнітних підшипниках, що є критичним для забезпечення стабільності ротора після обриву мас від удару [25].

Механічна поведінка традиційного монолітного сплаву Ti-6Al-4V при високих швидкостях деформації детально досліджується за допомогою в'язкопластичних моделей. Новітні дослідження [26] вказують на гостру необхідність використання повного тривимірного напруженого стану для калібрування параметрів руйнування. Зокрема, доведено, що показник тривісності напруженого стану та параметр Лодє є визначальними факторами для коректного моделювання розвитку мікротріщин та зриву матеріалу при високошвидкісних ударах.

Перехід до композитних матеріалів та металоматричних композитів вимагає адаптації наявних теорій. Було закладено міцні основи проектування та експериментального дослідження статичної міцності композиційних біметалічних лопаток [27]. Для металоматричних композитів на основі титану, зміцненого карбідом кремнію, механізм руйнування суттєво змінюється: наявність керамічного зміцнення зменшує загальну пластичність матриці, перетворюючи механізм руйнування на квазікрихкий, де первинним тригером стає порушення міжфазних меж між титаном та частинками SiC [28]. Прогнозування таких анізотропних в'язкопружних та пластичних властивостей композитів є критичним викликом, який було успішно вирішено чисельними методами у [29, 30]. Адекватне моделювання високошвидкісних ударних навантажень і перевезення складних конструкційних збірок також було продемонстровано авторами роботи [31, 32].

Для підвищення точності моделювання розшарування та пошкоджень використовуються новітні підходи, описані в [33-35]. Додаткові аспекти оптимізації композиційних структур та прогнозування їх руйнування під дією ударних навантажень активно вивчаються на базі інноваційних ґратчастих та біоінспірованих конструкцій [36-40]. Альтернативні методи моделювання зіткнень з птахами, зокрема застосування повнозв'язних нейронних мереж та покращених критеріїв руйнування, розглядаються у [41-45]. Специфічні підходи до ідентифікації констант Джонсона-Кука та характеристики поведінки сплавів за умов екстремального динамічного деформування описані в [46-49].

Підсумовуючи необхідність забезпечення структурної цілісності композитних лопаток, важливо також відзначити міцність і динамічні властивості складеної метал-матричної композиційної лопатки

ротора в контактних підшипникових опорах, детально розглянуті у нещодавньому дослідженні [50].

Незважаючи на значний загальний прогрес, у літературі залишається суттєва прогалина в інтеграції повновимірної тривимірної моделі пошкоджуваності з гідродинамікою згладжених частинок для прогнозування локального руйнування (відколів та фрагментації) саме металоматричних лопаток авіаційних двигунів. Метою даної роботи є усунення цього недоліку шляхом створення комплексної та математично обґрунтованої 3D-моделі удару птаха, яка здатна обробляти складний напружений стан та квазікрихкі ефекти.

2. Тривимірне формулювання напружено-деформованого стану при великих деформаціях. У випадку екстремально великих деформацій, типових для аеропружних ударних задач, кінематика суцільного середовища базується на лагранжевому описі руху. Поточне просторове положення матеріальної точки \mathbf{x} пов'язане з її початковим положенням \mathbf{X} через вектор переміщення \mathbf{u} : $\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{u}$.

Фундаментальною мірою деформації є тензор градієнта деформації \mathbf{F} , визначений як:

$$\mathbf{F} = \partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{X} = \mathbf{I} + \nabla_0 \mathbf{u}, \quad (1)$$

де \mathbf{I} – одиничний тензор другого рангу;

∇_0 – оператор градієнта за початковими координатами.

Оскільки процеси зіткнення є швидкоплинними, швидкість деформації матеріалу стає критичним фактором. Тензор градієнта швидкості просторового поля швидкостей \mathbf{v} визначається як $\mathbf{L} = \nabla \mathbf{v} = \partial \mathbf{F} / \partial t \mathbf{F}^{-1}$. Його симетрична частина формує тензор швидкості деформації \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = 1/2 (\mathbf{L} + \mathbf{L}^T), \quad (2)$$

а асиметрична частина тензор спіну (обертання):

$$\mathbf{W} = 1/2 (\mathbf{L} - \mathbf{L}^T). \quad (3)$$

Істинний напружений стан матеріалу в кожен момент часу t_1 описується тензором напружень Коші $\boldsymbol{\sigma}$. Згідно з принципами теорії пластичності, тензор напружень розкладається на кульову (гідростатичну) та девіаторну складові:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S} + \sigma_m \mathbf{I}, \quad (4)$$

де $\sigma_m = 1/3 \text{Tr}(\boldsymbol{\sigma}) = 1/3 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – середнє (гідростатичне) напруження, яке відповідає за зміну об'єму матеріалу;

\mathbf{S} – девіатор напружень, який відповідає за зміну форми (зсувні деформації).

Інтенсивність напружень (еквівалентне напруження за критерієм Губера-Мізеса-Генкі) σ_{eqv} у повному тривимірному просторі визначається через другий інваріант девіатора напружень J_2 :

$$\sigma_{eqv} = (3/2 \mathbf{S}:\mathbf{S})^{1/2} = (3J_2)^{1/2}. \quad (5)$$

Відповідно, еквівалентна швидкість пластичної деформації $\partial \epsilon_p / \partial t$ обчислюється як:

$$\partial \varepsilon_p / \partial t = (2/3 \mathbf{D}_p : \mathbf{D}_p)^{1/2}, \quad (6)$$

де \mathbf{D}_p – пластична складова тензора швидкості деформації, що виникає після перевищення матеріалом межі плинності.

Ключовим параметром, що характеризує складність просторового напруженого стану і критично впливає на розвиток мікропошкоджень (утворення пор, їх коалесценцію та утворення мікротріщин), є безрозмірний показник тривісності напруженого стану $\eta = \sigma_m / \sigma_{eqv}$.

При чистому зсуві $\eta = 0$, при одновісному розтягуванні $\eta = 1/3$, а в зонах концентрації напружень на кромках лопатки цей показник може досягати значень $\eta \geq 1$, що суттєво знижує пластичність матеріалу і провокує крихке руйнування [26].

3. Модель та властивості матеріалу. Для моделювання лопаток вентилятора використовувалися параметри сплаву Ti-6Al-4V [46]. Його деформування описується найбільш застосовною наразі моделлю пластичності і руйнування Джонсона-Кука [47], що перевірена експериментально, враховує деформаційне зміцнення із залежністю змінних в більшому діапазоні напружень від швидкості деформацій та має вигляд:

$$\sigma = (A + B \varepsilon_p^n)(1 + C \ln(\partial \varepsilon^* / \partial t))(1 - (T^*)^m), \quad (7)$$

$$p = \rho c^2 \mu_r (1 + (1 - \gamma_0/2) \mu_r - a \mu_r^2/2) / (1 - (S_1 - 1) - S_2 \mu_r^2 / (\mu_r + 1) - S_3 \mu_r^3 / (\mu_r + 1)) + (\gamma_0 + a \mu_r) E, \quad (9)$$

де ρ – густина матеріалу;
 E – модуль пружності матеріалу;
 c – відрізок кривої швидкостей;
 μ_r – об'ємний параметр або відносна густина;
 γ_0 – коефіцієнт Грюнайзена;

Таблиця 1 – Параметри повної моделі Джонсона-Кука, [51, 52]

Параметр	E	ρ	ν	A	B	n	C	G	m	T_m	C_p
Од. вим.	[ГПа]	[кг/м ³]	[-]	[ГПа]	[ГПа]	[-]	[-]	[ГПа]	[-]	[К]	[Дж·кг/К]
Ti-6Al-4V	122.625	4430	0.3	0.920	0.380	0.578	0.0420	42	1.1	1878	580

Таблиця 2 – Параметри пошкоджуваності, [51]

Параметр	D_1 , [-]	D_2 , [-]	D_3 , [-]	D_4 , [-]	D_5 , [-]
Ti-6Al-4V	-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

Таблиця 3 – Параметри моделі Грюнайзена

Параметр	c	S_1	S_2, S_3	γ_0	a
Од. вим.	[м/с]	[-]	[-]	[-]	[-]
Значення	5130	1.028	0	1.23	0.17

Як моделюючий матеріал для птаха був використаний пружнопластичний гідродинамічний матеріал і рівняння стану Мурнагана. У цій моделі границя текучості розраховується як:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + E_H \varepsilon_p + (a_1 + p a_2) \max[p, 0], \quad (10)$$

де E_H – модуль пластичного зміцнення, що визначається через модуль пружності та дотичний

де t – змінна часу;

ε_p – ефективна пластична деформація;

$\varepsilon^* = (\partial \varepsilon_p / \partial t) / (\partial \varepsilon_0 / \partial t)$;

$\partial \varepsilon_0 / \partial t = 1 \text{ с}^{-1}$;

A, B, n, C, m – залежні від властивостей матеріалу константи, що визначаються на основі експериментальних досліджень;

$T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$;

T_0, T_m – температура оточуючого середовища та температура плавлення матеріалу відповідно.

В спрощеній постановці рівняння Джонсона-Кука доповнюється граничними значеннями пластичних деформацій або напружень, після яких відбувається процес руйнування.

В повній постановці процес деформації руйнування визначається співвідношенням:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln(\partial \varepsilon^* / \partial t)) (1 + D_5 T^*), \quad (8)$$

де D_i ($i = 1..5$) – параметри матеріалу;

σ^* – коефіцієнт жорсткості напруженого стану.

Модель руйнування описує історію пошкодження кожного елемента за допомогою параметра пошкодження $D = \sum (\Delta \varepsilon_p / \varepsilon_f)$. Елемент руйнується при $D \geq 1$. В повній постановці модель Джонсона-Кука може доповнюватись рівнянням стану для тиску p , зокрема, рівнянням Грюнайзена [6, 51]:

a – коефіцієнт корекції об'єму першого порядку;

S_1, S_2, S_3 – 1^{ий}, 2^{ий} та 3^{ий} коефіцієнти нахилу.

Параметри повної моделі Джонсона-Кука і моделі Грюнайзена для титанового сплаву наведені в таблицях 1-3.

модуль або модуль зміцнення E_T , а рівняння Мурнагана має вигляд:

$$p = p_0 + b ((p / \rho_0)^\gamma - 1), \quad (11)$$

де p_0 – еталонний тиск;

ρ_0, γ – параметри матеріалу, які необхідно визначити експериментально.

Основне припущення, яке реалізовано в цій моделі матеріалу, полягає в тому, що сили, що діють на лопатку, в основному пов'язані зі зміною імпульсу птаха при ударі по лопатці.

Параметри рівняння стану Мурнагана для одиночного великого птаха наведені у таблиці 4 [7].

Таблиця 4 – Параметри рівняння стану Мурнагана

Параметр	ρ	G	σ_{T0}	E_H	B
Од. вим.	[кг/м ³]	[ГПа]	[кПа]	[кПа]	[ГПа]
Значення	942	2.07	20	1	0.128

4. Розрахункова модель удару птаха та лопаток ТВД. В попередніх роботах [20, 44, 51] був виконаний підбір оптимальних параметрів скінченно-елементної моделі вентиляторного ступеня ТВД та розмірів згладжених часток SPH моделі птаха для адекватного опису процесів високошвидкісного деформування лопаток ТВД під впливом удару великого птаха. Розрахункова модель вінця робочих лопаток вентилятора ТВД створювалася з використанням скінченних об'ємних елементів явного аналізу динамічних процесів. Для моделювання птахів, що летять, використовувалася гідродинамічна модель з дискретизацією обсягів моделі птахи методом SPH. Диск для посадки лопаток моделювався як жорстке циліндричне тіло, а контактне взаємодія полиць хвостовиків лопаток замінювалася на жорсткий зв'язок. Такий підхід дозволяє знизити загальну розмірність задачі без суттєвого порушення адекватності моделі. Однак це дозволяє використовувати більш часту та точну сітку в зоні очікуваних максимальних коливань на пері лопатки. Для визначення геометричних та структурних параметрів моделей птахів використовувався відомий підхід з поданням птаха-ударника у вигляді циліндричної моделі з напівсферичними торцями [48]. Густина дискретизації, застосована для одиночної великого птаха, становила ~ 16000 частинок (рис. 1).

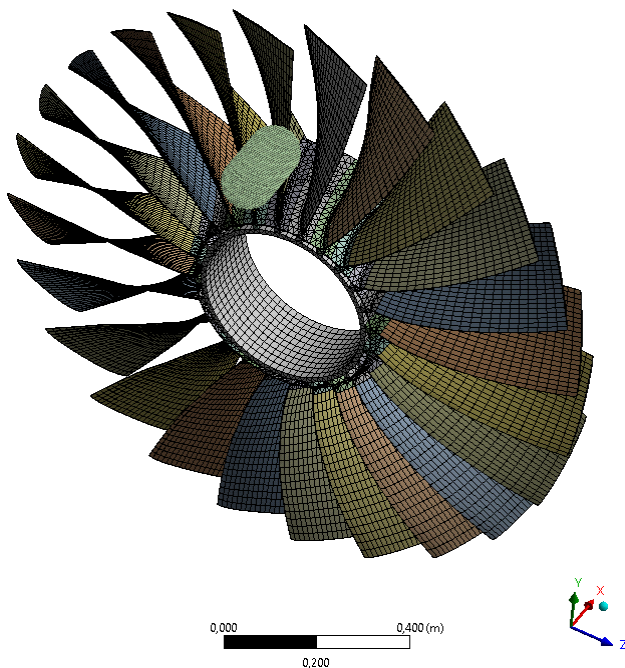


Рис. 1 – Повна розрахункова модель вентилятора ТВД

Окрім цього, в даній роботі пропонується ще одне уточнення з метою реалізації остаточної розрахункової математичної моделі як результату пошуку конфігурації з адекватним моделюванням динамічних пружно-пластичних процесів в системі з можливістю руйнування для проведення порівняльного аналізу з експериментальними даними стендових випробувань, а також передбачення ударних процесів лопаток з ММК.

Пропонується модель робочого колеса вентилятора з трьома секторами лопаток на модельному диску і гідродинамічною моделлю одиночного великого птаха з дискретизацією методом SPH, в якій застосована більш точна скінченно-елементна апроксимація лопаток за рахунок скорочення кількості лопаток (рис. 2). В цій розрахунковій моделі три лопатки, жорстко з'єднані між собою по бічним поверхням кореневих полиць, та птах розташовані таким чином, щоб при підльоті він потрапляв саме по цим лопаткам. Таке позиціонування стало можливим завдяки висновкам щодо поведінки системи в момент удару, попередньо зробленим на повних моделях. При цьому скінченно-елементне розбиття однієї лопатки, яка була верифікована за допомогою статичних та динамічних аналізів у неявній постановці [20, 51] з контролем похибки скінченно-елементної дискретизації. Модель птаха також зазнала в цьому випадку набагато більш точної дискретизації частинками SPH.

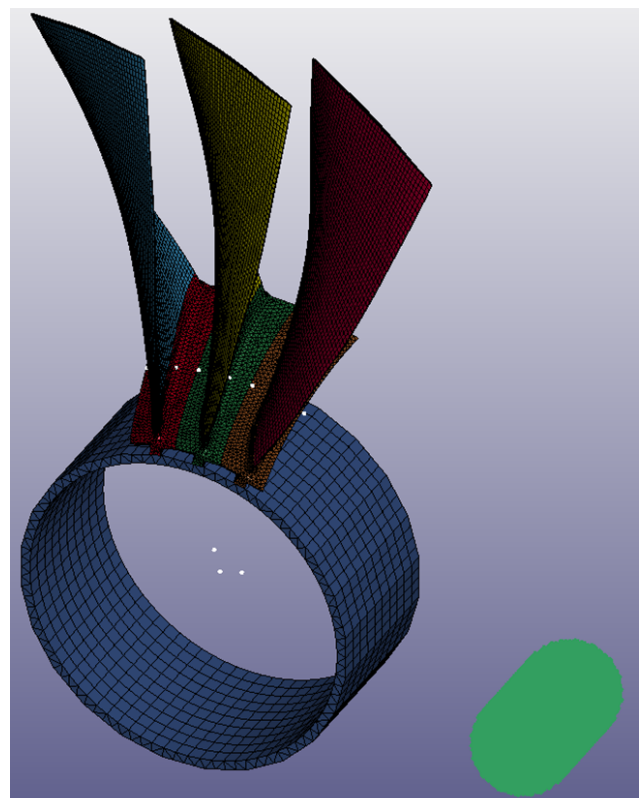


Рис. 2 – Уточнена розрахункова модель вентилятора ТВД

Для повної моделі робочого колеса і для скороченої моделі з трьома лопатками і уточненою сіткою скінченних елементів лопаток виконується один і той же розрахунковий експеримент з виведенням результатів для порівняльного аналізу з метою визначення впливу даного факту на адекватність моделювання і можливість симуляції процесів, спостережуваних в експериментах.

5. Результати порівняльного аналізу моделей з титановими лопатками. Для повної моделі робочого колеса і для скороченої моделі з трьома лопатками і

уточненою сіткою скінченних елементів лопаток виконується один і той же розрахунковий експеримент з виведенням результатів для порівняльного аналізу з метою визначення впливу даного факту на адекватність моделювання і можливість симуляції процесів, спостережуваних в експериментах. Стан лопаток вентилятора ТВД і птаха, що відповідають розрахунковому випадку з повним робочим колесом, показані на рис. 3, *a*, *б*.

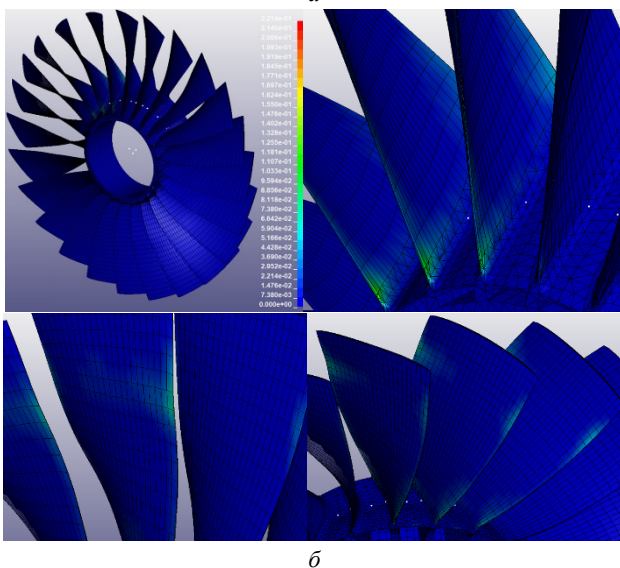
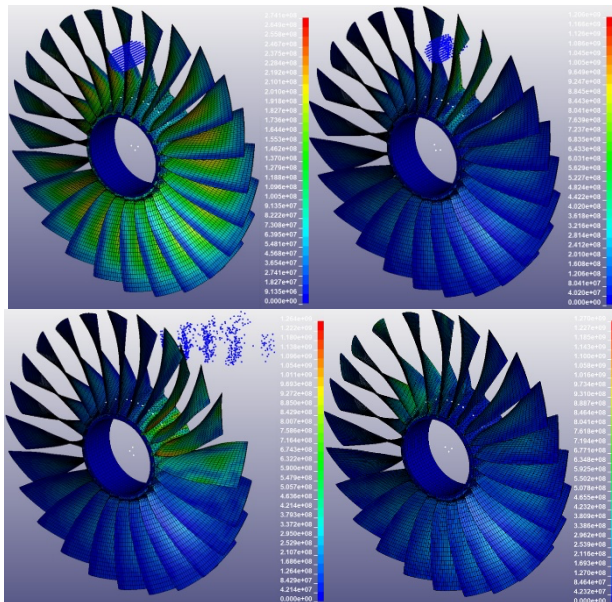


Рис. 3 – Розподіл результатів моделювання удару птаха об титанові лопатки вентилятора ТВД: *a* – еквівалентні за Мізесом напруження в різні моменти, [Па]; *б* – ефективні пластичні деформації [-] під різними ракурсами після удару

На них надані розподіли еквівалентних за критерієм Мізеса напружень і стан моделі птаха, змодельованою за допомогою гідродинамічних згладжених частинок з використанням пружно-пластичного гідро-динамічного матеріалу і рівняння стану Мурнагана, а також залишкові пластичні деформації в лопатках. Аналіз результатів показує, що

максимальні пластичні деформації в цьому випадку в два рази менші у порівнянні з попередніми симуляціями [44]. Це може бути пояснено зміненою моделлю матеріалу лопаток. Крім того, на передніх кромках лопаток, що приймають на себе ударну дію від птаха, є великі загини, які спостерігалися в результаті попередніх експериментів, але немає відколів матеріалу, можливість симуляції яких має забезпечуватися математичною моделлю матеріалу. Для усунення зазначених недоліків моделювання та реалізації перелічених ефектів потрібна симуляція процесів з використанням моделі робочого колеса вентилятора з трьома секторами лопаток з застосуванням уточненої СЕ апроксимації, що реалізована у розрахунковій схемі (рис. 2). Рис. 4, *a-г* показані еквівалентні напруження лопатки на їхніх деформованих формах у певні моменти взаємодії: підліт птаха до першої лопатки (рис. 4, *a*); удар птаха об першу лопатку (рис. 4, *б*); удару птаха об другу лопатку (рис. 4, *в*); удар птаха об третю лопатку (рис. 4, *г*). Це підтверджується при аналізі динамічних напружень на рис. 5, *a* в момент часу, удесятеро більший за момент удару птаха об третю лопатку. На ньому видно зруйновані ділянки лопаток на вхідних кромках в місцях попереднього удару птаха. При цьому, подібні графіки напружень показані на формі лопаток, яка складається з пластичної формозміни після удару та динамічних пружних коливань, які ще не встигають бути задемпфовані на такому невеликому проміжку часу. Момент, при якому виведений цей графік, підібраний так, щоб якомога точніше зловити процес проходження трьох лопаток через положення статичної рівноваги. Це дозволяє показати формозміну від пластичних деформацій (рис. 5, *б*).

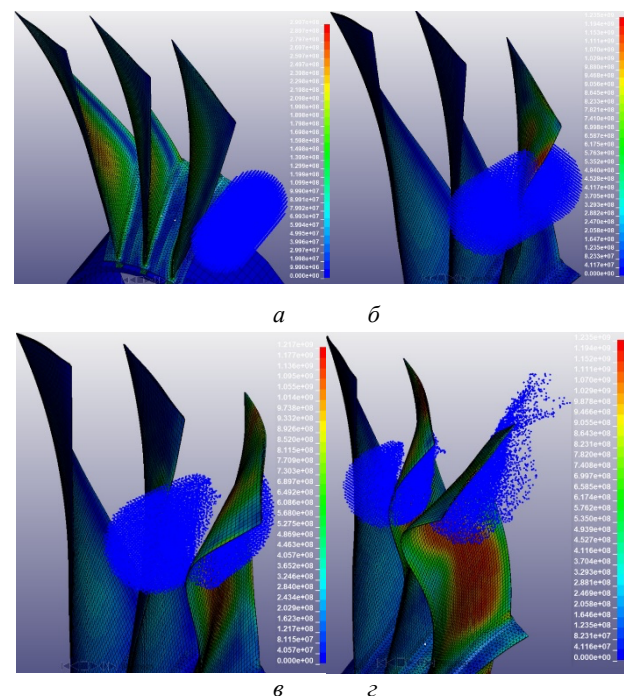


Рис. 4 – Розподіл еквівалентних за Мізесом напружень, [Па] в лопатках вентилятора ТВД з точнішою дискретизацією в моменти: *a* – 1.297 мс; *б* – 1.622 мс; *в* – 1.947 мс; *г* – 2.272 мс

Як видно з графіку, лопатки, особливо перша, зазнають суттєвих пластичних деформацій не лише у місцях попереднього контакту з птахом, а й по усій довжині, що не спостерігалось на менш точній моделі на рис. 3. В цілому, формозміна лопаток на більш точній моделі ще краще відповідає результатам

експериментальних досліджень, показаним у попередніх роботах [20, 44, 51], де при уважному перегляді можна побачити також невеликі відколи матеріалу на передній кромці в місці удару птаха, що спостерігаються на моделі з трьома лопатками.

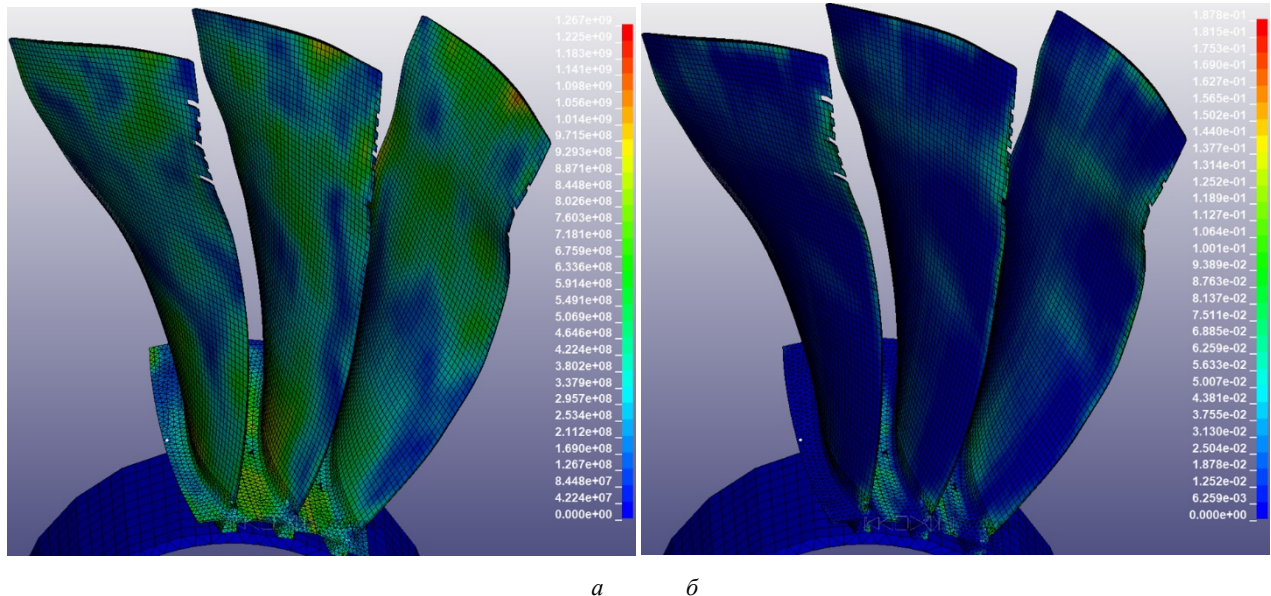


Рис. 5 – Розподіл результатів уточненого моделювання удару птаха об титанові лопатки вентилятора ТВД: *а* – еквівалентні за Мізесом напруження в різні моменти, [Па]; *б* – ефективні пластичні деформації [-] під різними ракурсами після удару

Висновки. Для чисельного моделювання удару птаха з композиційними лопатками ТВД проблема полягає в адаптації моделі Джонсона-Кука для композитів. Критичною прогалиною, визначеною в літературі, є відсутність стандартизованих параметрів для руйнування Ti/SiC при високих швидкостях деформації. Більшість досліджень спираються на квазістатичні дані, які є недостатніми для ударів птахів, де швидкості деформації грають суттєву роль.

Специфічним викликом у явній динаміці є ініціалізація стану обертання. Просте застосування швидкості обертання до лопатки у явному вирішувачі змушує її «дзвеніти» на її власній частоті – явище, відоме як паразитна осциляція. В роботі розроблений алгоритмічний підхід з використанням динамічної

релаксації з глобальним демпфуванням, щоб «розігнати» лопатку до стаціонарного стану перед запуском птаха. Цей метод гарантує, що напруження, виміряні під час удару, обумовлені зіткненням, а не чисельними артефактами.

Отже, представлена в роботі уточнена розрахункова модель удару птаха з лопатками вентилятора ТВД, виконаними з титанового сплаву, є придатною для подальших досліджень міцності їхнього аналога з метал-матричного композиту. Такий перехід був детально досліджений в роботі для алюмінієвого сплаву і метал-матричного композиту на його основі [14] та засвідчив позитивний ефект від впровадження композиційного матеріалу.

Інформація щодо наборів даних. Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

Заява щодо фінансування та подяки. Дослідження виконано за підтримки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», ДР № 0124U000975, термін виконання: 2024-2026 рр. Автори вдячні Наталі Сметанкіній, В'ячеславу Меркулову і Миколі Костіну за попередню плідну співпрацю в розглянутому в роботі напрямку.

Заява щодо конфлікту інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту. Інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

Список літератури

- [1] Y. Zhang, F. Wang, J. Liu, H. Zhao, C. Fu, W. Zhai, and K. Lu, "A survey of aero-engine blade modeling and dynamic characteristics analyses," *Aerospace*, vol. 11, no. 8, p. 638, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace11080638>.
- [2] R. Oruç, S. Aktemur, M. Yaşar, and Ö. Ö. Kanat, "Birds vs. metallic birds: a review of bird strikes in aviation," *Journal of Aviation*, vol. 6, no. 3, pp. 372–379, 2022, doi: <https://doi.org/10.30518/jav.1152384>.
- [3] D. B. Miracle, "Metal matrix composites – From science to technological significance," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 15-16, pp. 2526–2540, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
- [4] M. D. Hayat, H. Singh, Z. He, and P. Cao, "Titanium metal matrix composites: An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 418–438, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.005>.

- [5] R. Hedayati and M. Sadighi, *Bird strike: an experimental, theoretical and numerical investigation*. Woodhead Publishing, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100093-9.00003-0>.
- [6] R. Vignjevic, M. Orłowski, T. De Vuyst, and J. C. Campbell, "A parametric study of bird strike on engine blades," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 60, pp. 44–57, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.04.003>.
- [7] M. A. McCarthy, J. R. Xiao, C. T. McCarthy, A. Kamoulakos, J. Ramos, J. P. Gallard, and V. Melito, "Modelling bird impacts on an aircraft wing - Part 2: Modelling the impact with an SPH bird model," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 10, pp. 51–59, 2005, doi: <https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0325>.
- [8] Federal Aviation Administration (FAA), "Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States, 1990–2024," *National Wildlife Strike Database Serial Report*, 2025.
- [9] EASA, "Bird Strike and Ingestion - Bird orientation," *Deviation ref. M-TS-0000414*, 2025.
- [10] J. Cwiklak, E. Kobińska, and A. Gos, "Experimental and numerical investigations of bird models for bird strike analysis," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3699, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15103699>.
- [11] K.-M. Ha, "Bird strikes on civil aircraft: A systematic literature review," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 34, p. 101755, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101755>.
- [12] J. Zhang, W. Chen, J. Li, Y. Liu, F. Zhang, P. Li, C. Hu, and Q. Chang, "Spatiotemporal patterns of bird strikes at civil airports across China inferred from DNA barcoding (2012–2024)," *Avian Research*, vol. 17, is. 2, p. 100366, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.avrs.2026.100366>.
- [13] C. Sun, Q. Sun, J. Li, and C. Hu, "Migratory bird species as the primary contributors to wildlife collisions: a case study at Shanghai Pudong International Airport, China," *BMC Zoology*, vol. 11, no. 10, 2026, doi: <https://doi.org/10.1186/s40850-026-00257-3>.
- [14] M. Guida, F. Marulo, F.-Z. Belkhef, and P. Russo, "A review of the bird impact process and validation of the SPH impact model for aircraft structures," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 129, p. 100787, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100787>.
- [15] A. Pavlovic and G. Minak, "FEM-SPH numerical simulation of impact loading on floating laminates," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 8, p. 1590, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse11081590>.
- [16] A. Garg, W. Zheng, M.-O. Belarbi, and L. Li, "A review on the hybrid SPH-FEM-based bird impact analysis of laminated composite panels," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844251384370>.
- [17] Y. Zheng and C. Yan, "A coupled FDEM–SPH model for simulating problems of fluid–solid interaction," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 49, no. 14, pp. 3317–3336, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/nag.70017>.
- [18] S. Stoter, S. C. Divi, H. Van Brummelen, M. G. Larson, F. de Prenter, and C. V. Verhoosel, "Critical time-step size analysis and mass scaling by ghost-penalty for immersogeometric explicit dynamics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 412, p. 116074, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116074>.
- [19] M. H. Siemann and S. A. Ritt, "Novel particle distributions for SPH bird-strike simulations," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 343, pp. 746–766, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.08.044>.
- [20] V. Merkulov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Peculiarities of the modelling of the bird dynamic impact on fan blades of an aircraft turbojet engine at operating modes," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367, pp. 462–473, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_39.
- [21] G. Martynenko and V. Martynenko, "Computer modeling and simulation analysis of linear and nonlinear phenomena of rotor dynamics in systems with magnetic bearings," in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 213–217, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570097>.
- [22] G. Martynenko and V. Martynenko, "Identification of computational models of the dynamics of gas turbine unit rotors with magnetic bearings by incomplete data for design automation," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188, pp. 451–463, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570097>.
- [23] V. G. Martynenko and M. I. Hrytsenko, "Analysis of static and dynamic strength of the axial fan considering aerodynamic properties of the flow and nonuniformity of temperature field," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4/1, pp. 44–52, 2015.
- [24] V. Martynenko, M. Hrytsenko, and G. Martynenko, "Technique for evaluating the strength of composite blades," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 101, no. 3, pp. 451–461, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00572-9>.
- [25] G. Martynenko, V. Martynenko, and I. Pidkurkova, "Parametric numerical analysis of restoring magnetic forces dependences in radial active magnetic bearings with a given control law," in *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, pp. 1–6, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005766>.
- [26] J. Zhu, H. Zhi, T. Huang, N. Ding, and Z. Yan, "Research on the Johnson–Cook constitutive model and failure behavior of TC4 alloy," *Metals*, vol. 15, no. 9, p. 951, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/met15090951>.
- [27] В. Г. Мартиненко, М. І. Гриценко, та С. В. Мавродій, "Проектування, аналіз та експериментальне дослідження статичної міцності композиційної біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти," *Вісн. НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин*, № 38, с. 20–31, 2018, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>.
- [28] J. Shao, H. Xie, N. Liu, Y. Yang, and Z. Zheng, "An improved composite impact damage model and bird-striking damage analysis with smoothed particle hydrodynamics-finite element method," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 43, is. 15-16, pp. 939–958, 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844231198304>.
- [29] S. Karami, M. Haghighi-Yazdi, and M. Safarabadi, "Low-velocity impact behavior of 3D-printed sandwich panels with integrated composite face sheets," *Advanced Engineering Materials*, vol. 27, no. 1, p. 2401923, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202401923>.
- [30] V. G. Martynenko, "An original technique for modeling of anisotropic viscoelasticity of orthotropic materials in finite element codes applied to the mechanics of plates and shells," *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 389–413, 2017.
- [31] V. G. Martynenko and G. I. Lvov, "Numerical prediction of temperature-dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 36, no. 24, pp. 1790–1801, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684417727064>.
- [32] G. Martynenko, K. Avramov, V. Martynenko, M. Chernobryvko, A. Tonkonozhenko, and V. Kozharin, "Numerical simulation of warhead transportation," *Defence Technology*, vol. 17, is. 2, pp. 478–494, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.005>.
- [33] Z. Shirzadeh, M. Fakoor, and Z. Daneshjoo, "Simulating delamination in composite laminates with fracture process zone effects: A novel cohesive zone modeling approach," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 315, p. 110834, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.110834>.
- [34] W. Zhang, X. Chen, and J. Yang, "A convenient method for simulating crack propagation in panel structures based on the secondary development of ABAQUS," *Engineering Proceedings*, vol. 80, no. 1, p. 24, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/engproc2024080024>.
- [35] Y. Zhai, S. Li, and X. Zhang, "Vibration performance of composite doubly curved shells embedded with damping layer," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, p. 2650265, 2025, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219455426502652>.
- [36] M. A. Bin Riaz and M. Guden, "A review of the experimental and numerical studies on the compression behavior of the additively produced metallic lattice structures at high and low strain rates," *Defence Technology*, vol. 49, pp. 1–49, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.01.003>.
- [37] A. Garg, N. K. Shukla, M.-O. Belarbi, D. Mukherjee, M. Pushpavalli, R. Raman, M. Avcar, M. S. Narula, and L. Li, "Bird strike-induced damage studies on bio-inspired laminated plates with holes," *Aerospace Science and Technology*, vol. 162, p. 110200, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.110200>.
- [38] M. A. Aslam, S. Bin Rayhan, and K. Zhang, "Dynamic response of structurally reinforced wing leading edge against soft impact," *Aerospace*, vol. 9, no. 5, p. 260, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace9050260>.

[39] A. Garg, A. Sharma, W. Zheng, and L. Li, "Dactyl club and nacre-inspired impact resistant behavior of layered structures: A review of present trends and prospects," *Thin-Walled Structures*, vol. 41, p. 110553, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.twtcom.2024.110553>.

[40] M. A. S. Siddiqui, M. S. Rabbi, and M. T. Rahman, "An experimental review on enhancing the low and high-velocity impact resistance of NFCs through nanoparticle reinforcement," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 44, no. 17-18, pp. 1270–1298, 2024, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844241240569>.

[41] Z. Iqbal, M. A. Umer, K. Asim, and H. A. Khan, "Investigating damage resistance in aerospace radome applications: Experimental analysis of hybrid sandwich composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 44, no. 15-16, pp. 849–864, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844241229849>.

[42] Z. Hasılcı, M. E. B. oğulu, A. S. Dalkılıç, and A. Kayran, "Development of a prediction model using fully connected neural networks in the analysis of composite structures under bird strike," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, pp. 709–722, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0119-5>.

[43] C. Ganesan, S. Kondadi, U. Udaymohan, D. Singh, and M. Anthony Raja, "Numerical analysis of bird impact over the aircraft windshield," *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, vol. 14, pp. 83–86, 2022, doi: <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.1.18>.

[44] V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models," *Materials Today: Proceedings*, vol. 59, pp. 1797–1803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381>.

[45] D. Li, X. Jiang, L. Guo, and W. Zhang, "An experimental study of the dynamic responses of carbon fiber reinforced polymer composite laminates subjected to ice impact," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 41, no. 21-22, pp. 837–850, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844211073762>.

[46] X. Hou, Z. Liu, B. Wang, W. Lv, X. Liang, and Y. Hua, "Stress-strain curves and modified material constitutive model for Ti-6Al-4V over the wide ranges of strain rate and temperature," *Materials*, vol. 11, no. 6, p. 938, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11060938>.

[47] Z. A. Mierzejewska, R. Hudák, and J. Sidun, "Mechanical properties and microstructure of DMLS Ti6Al4V alloy dedicated to biomedical applications," *Materials*, vol. 12, no. 1, p. 176, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12010176>.

[48] D. Ivchenko and N. Smetankina, "The validation of the bird-impactor model for mathematical modelling of damage processes in turbofan engine parts," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188, pp. 403–414, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_34.

[49] Y. Shen, T. Ma, and J. Li, "Investigation of dynamic fractures under varying stress states," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 293, p. 110177, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110177>.

[50] В. Г. Мартиненко, "Міцність та динамічні властивості складеної метал-матричної композиційної лопатки ротора в контактних підшипникових опорах," *Вісн. НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин*, № 1, с. 3–11, 2025, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.1.328292>.

[51] N. Djordjevic, R. Vignjevic, T. De Vuyst, J. C. Campbell, and K. Hughes, "Modelling of bird strike on the engine fan blades using FE-SPH," in *15th Conference on Mathematics of Finite Elements and Applications: Conference Proceedings*, London: Brunel University, 2016. Дата звернення: 19.05.2026 [Online]. Доступно: <https://pdfs.semanticscholar.org/e11d/7071fd611df5d20f21390ce7c3c884a852f1.pdf>

[52] Y. Zhang, J. C. Outeiro, and T. Mabrouki, "On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting," *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 112–117, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.052>.

[53] V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Force Simulation of Bird Strike Issues of Aircraft Turbojet Engine Fan Blades," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 305, pp. 129–141, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_13.

References (transliterated)

- [1] Y. Zhang, F. Wang, J. Liu, H. Zhao, C. Fu, W. Zhai, and K. Lu, "A survey of aero-engine blade modeling and dynamic characteristics analyses," *Aerospace*, vol. 11, no. 8, p. 638, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace11080638>.
- [2] R. Oruç, S. Aktemur, M. Yaşar, and Ö. Ö. Kanat, "Birds vs. metallic birds: a review of bird strikes in aviation," *Journal of Aviation*, vol. 6, no. 3, pp. 372–379, 2022, doi: <https://doi.org/10.30518/jav.1152384>.
- [3] D. B. Miracle, "Metal matrix composites – From science to technological significance," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 15-16, pp. 2526–2540, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
- [4] M. D. Hayat, H. Singh, Z. He, and P. Cao, "Titanium metal matrix composites: An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 418–438, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.005>.
- [5] R. Hedayati and M. Sadighi, *Bird strike: an experimental, theoretical and numerical investigation*. Woodhead Publishing, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100093-9.00003-0>.
- [6] R. Vignjevic, M. Orłowski, T. De Vuyst, and J. C. Campbell, "A parametric study of bird strike on engine blades," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 60, pp. 44–57, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.04.003>.
- [7] M. A. McCarthy, J. R. Xiao, C. T. McCarthy, A. Kamoulakos, J. Ramos, J. P. Gallard, and V. Melito, "Modelling bird impacts on an aircraft wing - Part 2: Modelling the impact with an SPH bird model," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 10, pp. 51–59, 2005, doi: <https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0325>.
- [8] Federal Aviation Administration (FAA), "Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States, 1990-2024," *National Wildlife Strike Database Serial Report*, 2025.
- [9] EASA, "Bird Strike and Ingestion - Bird orientation," *Deviation ref. M-TS-0000414*, 2025.
- [10] J. Cwiklak, E. Kobialka, and A. Gos, "Experimental and numerical investigations of bird models for bird strike analysis," *Energies*, vol. 15, no. 10, p. 3699, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15103699>.
- [11] K.-M. Ha, "Bird strikes on civil aircraft: A systematic literature review," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 34, p. 101755, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101755>.
- [12] J. Zhang, W. Chen, J. Li, Y. Liu, F. Zhang, P. Li, C. Hu, and Q. Chang, "Spatiotemporal patterns of bird strikes at civil airports across China inferred from DNA barcoding (2012–2024)," *Avian Research*, vol. 17, no. 2, p. 100366, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.avrs.2026.100366>.
- [13] C. Sun, Q. Sun, J. Li, and C. Hu, "Migratory bird species as the primary contributors to wildlife collisions: a case study at Shanghai Pudong International Airport, China," *BMC Zoology*, vol. 11, no. 10, 2026, doi: <https://doi.org/10.1186/s40850-026-00257-3>.
- [14] M. Guida, F. Marulo, F.-Z. Belkhef, and P. Russo, "A review of the bird impact process and validation of the SPH impact model for aircraft structures," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 129, p. 100787, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100787>.
- [15] A. Pavlovic and G. Minak, "FEM-SPH numerical simulation of impact loading on floating laminates," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 8, p. 1590, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse11081590>.
- [16] A. Garg, W. Zheng, M.-O. Belarbi, and L. Li, "A review on the hybrid SPH-FEM-based bird impact analysis of laminated composite panels," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844251384370>.
- [17] Y. Zheng and C. Yan, "A coupled FDEM-SPH model for simulating problems of fluid-solid interaction," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 49, no. 14, pp. 3317–3336, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/nag.70017>.
- [18] S. Stoter, S. C. Divi, H. Van Brummelen, M. G. Larson, F. de Prenter, and C. V. Verhoosel, "Critical time-step size analysis and mass scaling by ghost-penalty for immersed geometric explicit dynamics," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 412, p. 116074, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116074>.
- [19] M. H. Siemann and S. A. Ritt, "Novel particle distributions for SPH bird-strike simulations," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 343, pp. 746–766, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.08.044>.

- [20] V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Peculiarities of the modelling of the bird dynamic impact on fan blades of an aircraft turbojet engine at operating modes," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367, pp. 462–473, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_39.
- [21] G. Martynenko and V. Martynenko, "Computer modeling and simulation analysis of linear and nonlinear phenomena of rotor dynamics in systems with magnetic bearings," in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 213–217, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570097>.
- [22] G. Martynenko and V. Martynenko, "Identification of computational models of the dynamics of gas turbine unit rotors with magnetic bearings by incomplete data for design automation," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188, pp. 451–463, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570097>.
- [23] V. G. Martynenko and M. I. Hrytsenko, "Analysis of static and dynamic strength of the axial fan considering aerodynamic properties of the flow and nonuniformity of temperature field," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4/1, pp. 44–52, 2015.
- [24] V. Martynenko, M. Hrytsenko, and G. Martynenko, "Technique for evaluating the strength of composite blades," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 101, no. 3, pp. 451–461, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00572-9>.
- [25] G. Martynenko, V. Martynenko, and I. Pidkurkova, "Parametric numerical analysis of restoring magnetic forces dependences in radial active magnetic bearings with a given control law," in *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, pp. 1–6, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005766>.
- [26] J. Zhu, H. Zhi, T. Huang, N. Ding, and Z. Yan, "Research on the Johnson–Cook constitutive model and failure behavior of TC4 alloy," *Metals*, vol. 15, no. 9, p. 951, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/met15090951>.
- [27] V. G. Martynenko, M. I. Hrytsenko, and S. V. Mavrody, "Proektuvannya, analiz ta eksperymentalne doslidzhennya statychnoyi mitsnosti kompozytsiynoyi bimetalichnoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryvuvannya shakhty," *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Dynamika I mitsnist mashyn*, no. 38, pp. 20–31, 2018, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>.
- [28] J. Shao, H. Xie, N. Liu, Y. Yang, and Z. Zheng, "An improved composite impact damage model and bird-striking damage analysis with smoothed particle hydrodynamics-finite element method," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 43, is. 15-16, pp. 939–958, 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844231198304>.
- [29] S. Karami, M. Haghghi-Yazdi, and M. Safarabadi, "Low-velocity impact behavior of 3D-printed sandwich panels with integrated composite face sheets," *Advanced Engineering Materials*, vol. 27, no. 1, p. 2401923, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202401923>.
- [30] V. G. Martynenko, "An original technique for modeling of anisotropic viscoelasticity of orthotropic materials in finite element codes applied to the mechanics of plates and shells," *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 389–413, 2017.
- [31] V. G. Martynenko and G. I. Lvov, "Numerical prediction of temperature-dependent anisotropic viscoelastic properties of fiber reinforced composite," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 36, no. 24, pp. 1790–1801, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0731684417727064>.
- [32] G. Martynenko, K. Avramov, V. Martynenko, M. Chernobryvko, A. Tonkonozhenko, and V. Kozharin, "Numerical simulation of warhead transportation," *Defence Technology*, vol. 17, is. 2, pp. 478–494, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.03.005>.
- [33] Z. Shirzadeh, M. Fakoor, and Z. Daneshjoo, "Simulating delamination in composite laminates with fracture process zone effects: A novel cohesive zone modeling approach," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 315, p. 110834, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2025.110834>.
- [34] W. Zhang, X. Chen, and J. Yang, "A convenient method for simulating crack propagation in panel structures based on the secondary development of ABAQUS," *Engineering Proceedings*, vol. 80, no. 1, p. 24, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/engproc2024080024>.
- [35] Y. Zhai, S. Li, and X. Zhang, "Vibration performance of composite doubly curved shells embedded with damping layer," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, p. 2650265, 2025, doi: <https://doi.org/10.1142/S0219455426502652>.
- [36] M. A. Bin Riaz and M. Guden, "A review of the experimental and numerical studies on the compression behavior of the additively produced metallic lattice structures at high and low strain rates," *Defence Technology*, vol. 49, pp. 1–49, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.01.003>.
- [37] A. Garg, N. K. Shukla, M.-O. Belarbi, D. Mukherjee, M. Pushpavalli, R. Raman, M. Avcar, M. S. Narula, and L. Li, "Bird strike-induced damage studies on bio-inspired laminated plates with holes," *Aerospace Science and Technology*, vol. 162, p. 110200, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.110200>.
- [38] M. A. Aslam, S. Bin Rayhan, and K. Zhang, "Dynamic response of structurally reinforced wing leading edge against soft impact," *Aerospace*, vol. 9, no. 5, p. 260, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace9050260>.
- [39] A. Garg, A. Sharma, W. Zheng, and L. Li, "Dactyl club and nacre-inspired impact resistant behavior of layered structures: A review of present trends and prospects," *Thin-Walled Structures*, vol. 41, p. 110553, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmtcomm.2024.110553>.
- [40] M. A. S. Siddiqui, M. S. Rabbi, and M. T. Rahman, "An experimental review on enhancing the low and high-velocity impact resistance of NFCs through nanoparticle reinforcement," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 44, no. 17-18, pp. 1270–1298, 2024, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844241240569>.
- [41] Z. Iqbal, M. A. Umer, K. Asim, and H. A. Khan, "Investigating damage resistance in aerospace radome applications: Experimental analysis of hybrid sandwich composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 44, no. 15-16, pp. 849–864, 2025, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844241229849>.
- [42] Z. Hasılci, M. E. Boğoçlu, A. S. Dalkılıç, and A. Kayran, "Development of a prediction model using fully connected neural networks in the analysis of composite structures under bird strike," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, pp. 709–722, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0119-5>.
- [43] C. Ganesan, S. Kondadi, U. Udaymohan, D. Singh, and M. Anthony Raja, "Numerical analysis of bird impact over the aircraft windshield," *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, vol. 14, pp. 83–86, 2022, doi: <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.1.18>.
- [44] V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models," *Materials Today: Proceedings*, vol. 59, pp. 1797–1803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381>.
- [45] D. Li, X. Jiang, L. Guo, and W. Zhang, "An experimental study of the dynamic responses of carbon fiber reinforced polymer composite laminates subjected to ice impact," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 41, is. 21-22, pp. 837–850, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/07316844211073762>.
- [46] X. Hou, Z. Liu, B. Wang, W. Lv, X. Liang, and Y. Hua, "Stress-strain curves and modified material constitutive model for Ti-6Al-4V over the wide ranges of strain rate and temperature," *Materials*, vol. 11, no. 6, p. 938, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11060938>.
- [47] Z. A. Mierzejewska, R. Hudák, and J. Sidun, "Mechanical properties and microstructure of DMLS Ti6Al4V alloy dedicated to biomedical applications," *Materials*, vol. 12, no. 1, p. 176, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12010176>.
- [48] D. Ivchenko and N. Smetankina, "The validation of the bird-impactor model for mathematical modelling of damage processes in turbofan engine parts," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 188, pp. 403–414, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_34.
- [49] Y. Shen, T. Ma, and J. Li, "Investigation of dynamic fractures under varying stress states," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 293, p. 110177, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmeccsi.2025.110177>.
- [50] V. G. Martynenko, "Mitsnist' ta dynamichni vlastyivosti skladenoyi metal-matrychnoyi kompozytsiynoyi lopatky rotora v kontaktnykh pidshypnykovykh oporakh [Strength and dynamic properties of a composite metal-matrix composite rotor blade in contact bearing supports]," *Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, Kharkov, NTU "KhPI" Publ., no. 1, pp. 3–11, 2025, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.1.328292>.
- [51] N. Djordjevic, R. Vignjevic, T. De Vuyst, J. C. Campbell, and K. Hughes, "Modelling of bird strike on the engine fan blades using

- FE-SPH," in *15th Conference on Mathematics of Finite Elements and Applications: Conference Proceedings*, London: Brunel University, 2016. Accessed: 19.05.2026 [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/e11d/7071fd611df5d20f21390ce7c3e884a852f1.pdf>
- [52] Y. Zhang, J. C. Outeiro, and T. Mabrouki, "On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting," *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 112–117, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.052>.
- [53] V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, and V. Martynenko, "Force Simulation of Bird Strike Issues of Aircraft Turbojet Engine Fan Blades," *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 305, pp. 129–141, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_13.

Надійшла (received) 02.04.2026

Прийнята до друку (accepted) 27.05.2026

Опублікована (published) 29.05.2026

Відомості про авторів та їх внесок / About The Authors And Their Contributions

Володимир Мартиненко (Volodymyr Martynenko) – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-79; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>; e-mail: Volodymyr.Martynenko@khp.edu.ua (концептуалізація, методологія, формальний аналіз, проведення досліджень, написання – початковий варіант тексту, написання – рецензування та редагування, візуалізація).

Геннадій Мартиненко (Gennadii Martynenko) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-79; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5309-3608>; e-mail: Gennadii.Martynenko@khp.edu.ua (концептуалізація, методологія, перевірка, написання – рецензування та редагування, нагляд).

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.