

І.А. Бойко, к.т.н., докторант

П.П. Мельничук, д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Використання титанових сплавів під час виготовлення складнопрофільних деталей авіаційних двигунів

В авіадвигунобудуванні використовується широка номенклатура конструкційних матеріалів, що пов'язано як із різноманітністю умов роботи окремих елементів двигуна, так і з високими вимогами до самих матеріалів, що використовуються. Одним з елементів авіаційного двигуна, до якого висуваються жорсткі вимоги щодо точності і якості виготовлення складових деталей і вузлів, є ротор компресора. Використання титанових сплавів пов'язано як із високою частотою обертання ротора на робочих режимах (до 20000 об/хв), так і з необхідністю виключити негативні чинники, такі як вібрації, руйнування окремих деталей внаслідок появи тріщин, зношування, механічних пошкоджень, корозії, припрацювання тощо. Саме це сприяло широкому використанню в авіадвигунобудуванні титанових сплавів, які вирізняються високою міцністю, стійкістю до корозії і невеликою вагою порівняно із залізовмісними матеріалами. Однак обробка титанових сплавів ускладнюється їх низькою теплопровідністю, а також високою міцністю і еластичністю, що, в процесі їх механічної обробки, призводить до виникнення значних вібрацій, інтенсивного зношування різального інструменту внаслідок деформаційного зміцнення поверхневого шару матеріалу, адгезії між матеріалом інструменту і заготовки, високого теплового навантаження на різальний інструмент. До таких деталей належать лопатки, проставки, диски, колеса вентиляторів, кронштейни, деякі корпусні деталі, моноколеса.

Проаналізовано стан питання і основні напрями досліджень щодо забезпечення підвищення оброблюваності тонкостінних деталей, виготовлених із титанових сплавів, а також особливості обробки складнопрофільних поверхонь деталей типу «моноколесо» на високошвидкісних обробних центрах. Наведено результати досліджень щодо зменшення регенеративних автоколивань, використання демпфуючих матеріалів, модуляції швидкості головного руху, а також вибору оптимального інструментального матеріалу.

У підсумку сформувано висновки про перспективність і напрями подальших досліджень, спрямованих на підвищення ефективності процесу лезової обробки складнопрофільних деталей виробів з титанових сплавів.

Ключові слова: титанові сплави; моноколесо; складнопрофільна поверхня; багатокординатна обробка; багатоцільовий верстат; твердий сплав.

Актуальність теми. Основним напрямом розвитку авіадвигунобудування є виробництво двигунів з підвищеними показниками ресурсу, надійності, безвідмовності, економічної ефективності тощо. Одним із найбільш відповідальних елементів авіаційного двигуна є ротор компресора, більшість елементів якого виготовляється із титанових сплавів. Враховуючи високу трудомісткість виготовлення деталей і вузлів, актуальною стає проблема пошуку шляхів скорочення часу, що витрачається на механічну обробку складнопрофільних поверхонь. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав недостатню кількість наукових напрацювань саме в питанні науково-технологічного забезпечення ефективності виготовлення складнопрофільних деталей з титанових сплавів, до яких висуваються високі вимоги щодо якості і точності обробки, оскільки такі деталі працюють в умовах циклічних вібраційних, аеродинамічних, температурних і механічних навантажень, а також проводяться роботи в умовах корозійного і ерозійного середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питанням обробки тонкостінних деталей присвячені роботи як вітчизняних, так і зарубіжних авторів. Дослідженням коливань та їх впливу на якість і точність обробки тонкостінних деталей присвячені роботи Ю.М. Внукова, С.І. Дяді, В.О. Логомінова, О.Б. Козлової, В.Ф. Мозгового, О.Я. Качана, К.Б. Балущка [3–5, 9–11], М.О. Сікало [15]. Arnaud L., Dessein G., Gonzalo O. показали [1, 2], що модуляція частоти обертання шпинделя з урахуванням змін жорсткості та власних частот тонкостінної конструкції під час фрезерування дозволяє суттєво покращити якість обробки та стабільність процесу, цьому ж питанню були присвячені роботи В.М. Тонконогого та С.А. Зелінського [17].

Питання технологічного забезпечення якості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток, виготовлених з титанових сплавів, вивчав Г.І. Іщенко [6], підвищення працездатності різального інструменту – М.О. Ковришкін [7], Б.М. Середенко [14], Ю.Є. Рижов [12].

Викладення основного матеріалу. Титанові сплави набули широкого використання у деталях газотурбінного двигуна (ГТД), оскільки мають дві суттєві переваги порівняно з іншими конструкційними

матеріалами: високу питому міцність і високу корозійну стійкість. На лопатки ротора компресора діють згинні і розтягуючі навантаження під дією набігаючого потоку повітря, інших динамічних (вібраційних) навантажень. У дисках виникають різноманітні навантаження під дією відцентрової сили. Враховуючи високу частоту обертання ротора компресора, матеріал, із якого виготовляються диски і лопатки, має забезпечувати здатність чинити спротив зародженню і розповсюдженню тріщин [6], на що суттєво впливатиме ударна в'язкість матеріалу [16].

Залежно від умов роботи деталі необхідні механічні властивості забезпечуються не тільки використанням різних марок титанових сплавів (фактично набором легуючих елементів), а і формуванням спеціального структурного стану за рахунок комплексної термічної і деформаційної обробки. Для лопаток більш бажаною є рівновісна структура (рис. 1), що забезпечує високу пластичність і границю витривалості. Для дисків – структура пластинчастого або бімодального типу, яка матиме нижчу, порівняно із рівновісною структурою, пластичність, але матиме вищу міцність.

Найбільшого розповсюдження як матеріалу для виготовлення роторних деталей ГТД набули двофазні ($\alpha + \beta$) деформовані титанові сплави: BT3-1, BT6, BT8 (BT8-1), BT9, хімічний склад яких наводиться в таблиці 1.

Легуючі елементи можна розділити за їх впливом на температуру поліморфного перетворення і області існування α – фази з гексагональною щільноупакованою решіткою, або β – фази з кубічною об'ємно-центруючою решіткою. До першої групи елементів, що впливають на α – фазу, належить алюміній, індій, галій, кисень, азот і вуглець. Збільшення вмісту алюмінію призводить до підвищення жароміцності і міцності, в той час як пластичність і в'язкість руйнування знижуються. До елементів, що впливають на β – фазу, належить кремній, залізо, марганець, хром, кобальт, мідь. Кремній підвищує супротив повзучості при вмісті в межах від 0,15 до 0,35 %, подальше збільшення вмісту призведе до зниження границі повзучості. Молібден і ванадій підвищують міцність, корозійну стійкість та твердість. Ванадій також підвищує пластичність, однак зі збільшенням його концентрації зміцнююча дія порівняно із молібденом значно знижується. Такі елементи, як вольфрам, осмій, іридій, рутеній, реній, збільшують міцність сплаву. Олово і цирконій збільшують жароміцність.

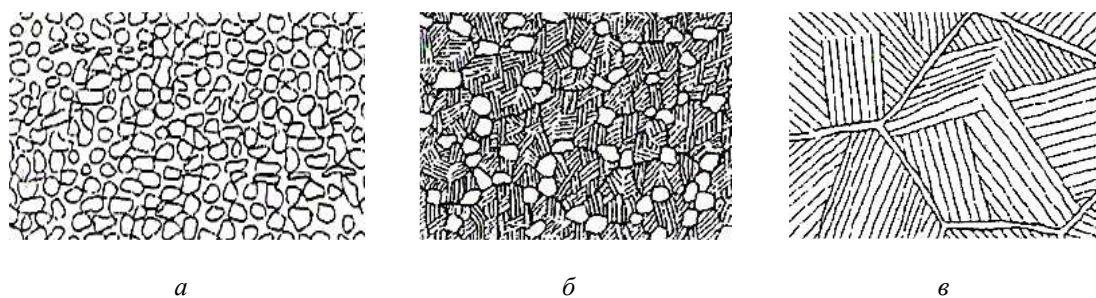


Рис. 1. Типи мікроструктури двофазних титанових сплавів: а – рівновісна, б – бімодальна, в – пластинчаста

Таблиця 1

Хімічний склад двофазних титанових деформованих сплавів

Марка сплаву	Вміст елементів, %								
	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	Zr	V	N
BT3-1	5,5...7,0	2,0...3,0	0,8...2,3	0,15...0,4	0,2...0,7	0,1	0,5	-	<0,015
BT6	5,3...6,8	-	-	0,1	0,6	0,1	0,3	3,5...5,3	<0,015
BT8-1	5,8...7,0	2,8...3,8	-	0,2...0,4	0,3	0,1	0,5	-	<0,015
BT9	5,8...7,0	2,8...3,8	-	0,2...0,35	0,25	0,1	2,0	-	<0,015

Найкращі характеристики міцності сплаву забезпечується при мінімальній різниці між міцністю α – і β – твердих розчинів, оскільки під час навантажень вони більш однорідно пластично деформуються.

Сплав BT3-1 є базовим титановим сплавом, але порівняно з більш сучасними BT6, BT8-1 має меншу жаростійкість. Сплав BT6 має більшу міцність порівняно з BT3-1, але меншу пластичність. BT8-1 відрізняється високим рівнем тріщиностійкості і стабільністю мікроструктури при циклічних температурних навантаженнях.

Для підвищення тріщиностійкості, ударної в'язкості і термостабільності готових деталей їх піддають термічній обробці. Зокрема, термообробку виконують після попередньої чорнової механічної обробки для зняття внутрішніх напружень.

Одними із елементів ротора компресора ГТД, які вирізняються складністю форм поверхонь, є лопатки. Консольні лопатки ротора компресора виконуються із ялинковим замком, або із кріпленням типу «ластівчин хвіст», за допомогою яких вони закріплюються на диску. Обробка «спинки» і «корита» на таких лопатках виконується на трикоординатних фрезерних верстатах, та в деяких випадках на п'ятикоординатних обробних центрах.

Не рідкість використання в ГТД деталей типу моноколесо (рис. 2–3), в яких лопатки і диск є одним цілим. Складність обробки деталей типу моноколесо полягає у обмеженості простору для виконання фрезерування профілю лопаток. Сусідні лопатки закривають і суттєво обмежують собою частину простору навколо лопатки, що обробляється, змушуючи програміста шукати шляхи для побудови траєкторії руху інструменту, що дозволить виконати обкатку (фрезерування) лопатки з обох сторін. Особливу складність викликає обробка простору між сусідніми лопатками і комлевої частини лопатки, радіусів заокруглення тощо. Це пов'язано із необхідністю використання різального інструменту із великим вильотом, оскільки висота лопатки може досягати 200–300 мм.

Товщина і ширина звичайної лопатки незначно змінюється вздовж її довжини, то лопатки деталей типу моноколесо можуть мати значні зміни по обох параметрах. Якщо розглянути велику лопатку відцентрового моноколеса (рис. 1, б) то можна зазначити, що якщо по товщині вона змінюється незначно, то висота (або ширина) вхідної і вихідної її частини змінюється від 50 до 5 мм відповідно. Крім того, варто звернути увагу на криволінійність профілю лопатки.

Щодо колеса робочого (рис. 1, а), то тут, окрім великого співвідношення довжини до ширини лопатки ($5 < h/l < 8$), відзначається значна зміна максимальної товщини лопатки ($C_{\max}$) і ширини по хорді (L) в різних перетинах по висоті лопатки (рис. 4).

Для забезпечення плавності переходу від «спинки» до «корита» обробку вхідної і вихідної кромки, які найчастіше являють собою радіус заокруглення, виконують за один прохід без розривів за кожним рівнем обробки. Кількість врізань інструменту у матеріал намагаються мінімізувати, задля уникнення появи зарізів і уступів, що можуть виникати внаслідок пружних відтискань, а також вібрацій від врізання фрези в маложорстку лопатку.



а



б

Рис. 2. Приклади деталей типу «моноколесо»: а – колесо вентилятора, б – колесо відцентрове з трьома лопатками

Під час обробки профілю лопаток на фрезерних верстатах з ЧПУ використовують інструменти зі сферичною різальною частиною (рис. 5), що пов'язано із необхідністю обробки профілю складної форми. Широкого застосування при обробці титанових сплавів набули твердосплавні різальні інструменти. Основні характеристики відомих марок твердих сплавів зарубіжного виробництва наводяться в таблиці 2. Зазвичай використовують траєкторії руху інструменту, де вісь інструменту розташовується по нормалі до поверхні, що обробляється (для п'ятикоординатної обробки), а також огинанням інструментом обробленої поверхні (для трикоординатної обробки). Однак у випадку обробки моноколес виникають додаткові обмеження, пов'язані із необхідністю убезпечення різального інструменту від контакту із сусідніми лопатками, що може призвести до його поломки. В таких випадках доводиться застосовувати альтернативні методи керування вектором інструмента, такі як «сплайн», або «масив векторів». За таких умов обробка поверхонь деталі може виконуватися будь-якою точкою на сфері різального інструменту,

а напрямки сили різання відносно оброблюваної поверхні і осі інструмента змінюватися суттєво, що, враховуючи низьку жорсткість лопаток і можливі великі вильоти інструменту, негативно впливатиме на якість обробленої поверхні і точність обробки.



Рис. 3. Фрезерування колеса вентилятора на п'ятикоординатному обробному центрі

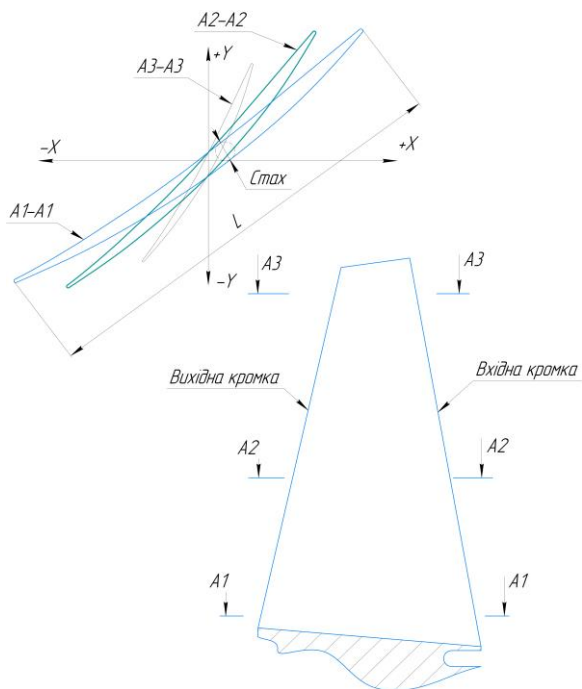


Рис. 4. Зміна профілю лопатки колеса вентилятора за трьома перетинами

Особлива увага приділена дослідженню регенеративних автоколивань [16], що виникають під час різання по хвилястому сліду, що залишається на поверхні деталі від попереднього проходу інструменту і, відповідно, негативно впливатимуть на якість обробленої поверхні. Серед запропонованих заходів боротьби із регенеративними автоколиваннями пропонується використання фрез зі змінним кутом нахилу різальної кромки [5, 8]. Для проведення досліджень було запропоновано фрезу [9] з регульованим кутом нахилу різальної кромки. Дослідження проводилося на стенді для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей [11]. Зауважується, що збільшення кута нахилу різальної кромки ω від 0 до 60° підвищує вібростійкість процесу фрезерування, особливо в діапазоні від 30 до 45°. Також позитивний ефект досягається при використанні різнонахиленості двох сусідніх зубів, при цьому максимальний результат досягається при невеликій різниці в кутах нахилу ($\Delta\omega$ 3–6°), а додавання заточки стрічки шириною від 0,05 до 0,1 мм на задній поверхні різальної кромки дає додаткове зниження автоколивань до двох разів.

Таблиця 2

Характеристики марок твердих сплавів зарубіжного виробництва

Сорт	Класифікація (ISO)	Середній розмір зерна (мкм)	Твердість HV30	Міцність на вигин (Н/мм ²)	Густина (г/см ³)	WC (%)	Co (%)	Коеф. тріщиностійкості K _{1C} (МПа·м ^{1/2})	Виробник
DK460UF	K30–K40	0,60	1620	4100	14,45	90,0	10,0	10,6	Berlin-carbide, Guhring
H10F	K20–K30	0,8	1600	4300	14,45	90,0	10,0	10,5–11	Sandvik Hyperion
K40UF	K40–K50	0,6	1610	> 4000	14,5	90,0	10,0	10,5	Konrad Friedrichs

За результатами досліджень сформульовано визначальне співвідношення ВС, рівне $BC = \frac{t_{різ}}{T_{вке}}$, де $t_{різ}$ – час різання одним зубом, $T_{вке}$ – період власних коливань тонкостінного елемента, та визначено 4 швидкісні зони з різними видами виникаючих коливань, а автоколивання виникають у третій зоні за умови $1 \leq BC < 7$.



Рис. 5. Приклади конусних сферичних твердосплавних фрез для обробки складнопрофільних поверхонь

шпинделя не досягає верхньої і нижньої межі модуляції. Виконано дослідження впливу модуляції швидкості головного руху при обробці зразків із СтЗкп (ДСТУ 2651:2005) кінцевою фрезою $\varnothing 20$ мм зі змінними багатограничними пластинами з твердого сплаву зі зміною частоти модуляції від 1,5 до 5 Гц з кроком 0,5 Гц було встановлено, що регенеративні коливання можуть бути подавлені в межах до 75 % від усього часу різання. При цьому максимальний ефект досягається при частоті модуляції 3 Гц і глибиною модуляції 20 %. Позитивний ефект зростає, починаючи з частоти модуляції 1,5 Гц, і після досягнення максимуму на частоті 3 Гц поступово зменшується.

Одним із засобів боротьби із вібраціями при кінцевому фрезеруванні моноколів є застосування спеціалізованих демпфуючих матеріалів, якими заповнюється міжлопатковий простір, таким чином збільшуючи жорсткість лопатки, що обробляється. В роботі [3] зазначається, що на якість обробки складнопрофільних поверхонь моноколів суттєво впливає спосіб заповнення простору між лопатками. При використанні демпфуючого матеріалу, який знаходиться у в'язкотекучому стані простежується майже подвійне збільшення жорсткості системи порівняно із заліпленням матеріалу в пластичному стані. Це пояснюється тим, що при заповненні простору між лопатками матеріалом у пластичному стані отримана структура складається із множини окремих елементів, на межах з'єднання (контакту) яких мають місце безліч дефектів, зокрема: пори, рихлоти, а також спостерігається погане зчеплення матеріалу із лопатками, що призводить до передчасного вививання елементів демпфуючого матеріалу напором мастильно-охолоджувальної рідини, руйнування внаслідок контакту із різальним інструментом і вібрацій.

В той же час використання технологій підготовки демпфуючого матеріалу, при якій він розігрівається до в'язкотекучого стану, дозволяє після заливки деталі і подальшої кристалізації отримати однорідну структуру, що позитивно впливає на міцність отриманої структури. Ще одним заходом зі збільшення жорсткості лопаток під час обробки є заповнення демпфуючим матеріалом не тільки простору між лопатками, а і вихід за межі вхідної і вихідної кромки лопаток на певну відстань, що дозволить утворити монолітну структуру, яка повністю охоплює лопатку, що обробляється, відповідно збільшуючи її жорсткість. Авторами [10] розроблено стенд для дослідження в'язкопружних демпфуючих середовищ, призначених для чистової обробки лопаток моноколів ГТД.

У [12] досліджувалася працездатність різноманітних інструментальних матеріалів, серед яких твердий сплав ВК8, полікристалічний надтвердий матеріал на основі алмазу (алмазно-твердосплавні пластини (АТП) та кубічного нітриду бору (CBN). При попутному чистовому фрезеруванні титанового сплаву BT22 без використання мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) кінцевою однозубою фрезою з механічним кріпленням різальних елементів найкращий результат по стійкості і зносу показали інструмент з CBN, оскільки має вищу стійкість, ніж з ВК8. Алмазно-твердосплавні пластини мають майже вдвічі нижчу стійкість, ніж пластини з CBN і ВК8 (25 і 45 хв відповідно), що пов'язано із критичним зносом внаслідок дії високої температури в зоні різання, який має ознаки абразивного. Використання МОР дозволяє збільшити стійкість пластини з CBN до 2,5–3 разів, тому незважаючи на превалююче використання при обробці титанових сплавів твердосплавних різальних інструментів, питання використання пластин з CBN і відповідна економічна доцільність їх застосування вимагає додаткових досліджень.

У статті [1, 2] досліджується вплив процесу зняття матеріалу на зміну динамічних характеристик тонкостінних деталей під час периферійного фрезерування. Показано, що традиційні двовимірні графіки

стабільності (двовимірні діаграми, які відображають залежність частоти обертання від глибини різання) не враховують змінну жорсткість заготовки, яка відбувається під час різання на різних ділянках обробки (переміщення інструменту від вхідної до вихідної кромки, та від вершини лопатки до її кореневої частини), що призводить до неточностей у прогнозуванні виникнення вібрацій. У роботі запропоновано тривимірну модель графіків стабільності, яка враховує положення інструмента по довжині заготовки, дозволяючи адаптувати режими різання до локальних змін динаміки. Створена 3D-схема визначення зон стійкості, яка дозволяє визначити значення частоти обертання шпинделя, за якої досягається необхідна якість поверхні оброблюваної деталі. Враховуючи те, що жорсткість деталі, що обробляється, і різального інструмента (фрези) набагато менша за жорсткість верстата (рис. 6.) [1], отримуємо такі рівняння коливань технологічної системи [1] за двома координатами:

$$\ddot{y}(t) + \zeta^2 \dot{y}(t) + \omega_{\partial y}^2 y(t) = F_y(t) \frac{1}{m_{dy}}, \quad (1)$$

$$\ddot{x}(t) + \zeta^2 \dot{x}(t) + \omega_{\partial x}^2 x(t) = F_x(t) \frac{1}{m_{dx}}, \quad (2)$$

де $\zeta^2 = c / m$ – коефіцієнт демпфування;

$\omega^2 = j / m$ – власна частота коливань;

m – маса деталі;

j – жорсткість.

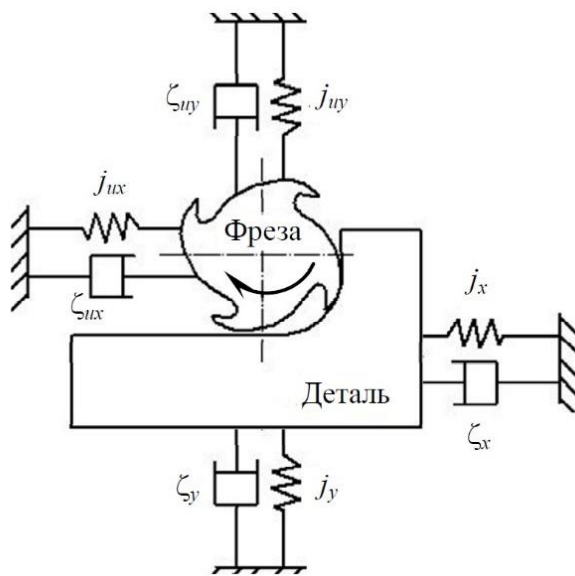


Рис. 6. Динамічна схема коливань технологічної системи за умови, що жорсткість фрези і деталі набагато менші за жорсткість верстата [13]

оброблюваного матеріалу, зокрема окисновмісного шару, та негативно впливати на стійкість різального інструменту. Експериментальна перевірка результатів математичного моделювання процесу різання показала похибку в межах 16 %, що є достатньо прийнятним результатом.

Для підвищення швидкостей різання титанових сплавів насамперед необхідно вирішити питання зниження температури в зоні різання. При цьому потребує дослідження вплив матеріалу різальної частини інструменту при обробці титанових сплавів, зокрема імпортованих аналогів твердих сплавів ВК6 і ВК8 і інструменту з кубічного нітриду бору, а також геометрії інструменту, зокрема стружколомів на змінних багатогранних пластинах, на цей процес.

Одним із найбільш дієвих заходів щодо підвищення стійкості різального інструменту при обробці титанових сплавів є використання зносостійких захисних покриттів [7].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Титанові сплави (зокрема ВТ3-1, ВТ6, ВТ8-1, ВТ9) мають високу питому міцність, корозійну стійкість і термостабільність, що зумовлює їх широке застосування у виготовленні складнопрофільних роторних деталей авіаційних двигунів. Механічна обробка складнопрофільних деталей, зокрема моноколів, нерозривно пов'язана із вирішенням питання забезпечення необхідних показників якості і точності обробки, оскільки особливості конструкції даних деталей ставлять низку задач із забезпечення жорсткості конструкції для зменшення регенеративних коливань, підвищення стійкості різального інструменту, зниження трудомісткості обробки тощо.

Визначенню температури різання і її впливу на процес кінцевого фрезерування титанових сплавів як експериментально, так і за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів присвячена робота [14]. За результатами математичного моделювання процесу різання титанового сплаву ВТ6 фрезою з твердого сплаву ВК8 температури оброблюваної заготовки, стружки і інструмента в процесі, можна зауважити значне зростання температури в зоні різання зі зростанням швидкості різання. При швидкості різання $V = 80$ м/хв максимальна температура спостерігається на поверхні стружки (620°C), в той час на поверхні інструменту і заготовці температура становить 560 і 470°C відповідно. Подальше підвищення швидкості різання до 250 м/хв доводить температуру стружки до значення 985°C . Відповідно зростатимуть температури на поверхні інструменту (870°C) і заготовки (740°C). Такі високі температури в зоні різання можуть призвести до виникнення структурних перетворень у поверхневому шарі

Враховуючи розглянуті особливості використання титанових сплавів у деталях ГТД, необхідно виконати дослідження з використанням сучасного конусного сферичного твердосплавного різального інструменту при фрезеруванні складнопрофільних тонкостінних поверхонь, що матимуть змінну жорсткість вздовж траєкторії руху різального інструменту.

Потребує дослідження питання доцільності використання CBN різального інструменту або його аналогів, при обробці титанових сплавів, а також економічна ефективність їх використання порівняно із інструментом з твердого сплаву.

Список використаної літератури:

1. Influence of material removal on the dynamic behavior of thin-walled structures in peripheral milling / V.Thevenot, L.Arnaud, G.Dessein, G.Cazenave-Larrochea // *Machining Science and Technology: An International Journal*. – 2006. – Vol. 10, Issue 3. – P. 275–287.
2. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures / L.Arnaud, O.Gonzalo, S.Seguy and other // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 67, № 1–4. – P. 157–166.
3. Опробування вдосконаленої технології підготовки та нанесення демпфуючого середовища на моноколеса ГТД при кінцевому фрезеруванні / Ю.М. Внуков, А.І. Гермашев, В.Ф. Мозговий та ін. // *Вісник двигунобудування*. – 2015. – № 1. – С. 128–130.
4. Дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні та їх вплив на формування обробленої поверхні / С.І. Дядя, О.Б. Козлова, Є.В. Кушнір, Д.Р. Карамуша // *Нові матеріали і технології в металургії і машинобудуванні*. – 2022. – № 2. – С. 71–77.
5. Дядя С.І. Методи пригнічення вібрацій при фрезеруванні тонкостінних деталей / С.І. Дядя, А.Гермашев, О.Б. Козлова // *Тези доповідей 12-ого міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові, 28–29 травня*. – Львів, 2015. – С. 83–84.
6. Іщенко Г.І. Технологічне забезпечення якості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Г.І. Іщенко. – Харків, 2020. – 190 с.
7. Ковришкін М.О. Методи підвищення працездатності різального інструменту / М.О. Ковришкін, О.В. Шевченко // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – 2010. – Вип. 23. – С. 298–302.
8. Козлова О.Б. Пригнічення регенеративних автоколивань при фрезеруванні тонкостінного елемента деталі кінцевими циліндричними фрезами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / О.Б. Козлова. – Харків : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т», 2016. – 24 с.
9. Пат. UA 104343 Україна, МПК (2016.01) B23C 5/00. Фреза з регульованими кутами нахилу різальних кромок кожного зуба / Дядя С.І., Козлова О.Б. ; заявник та власник патенту ЗНТУ. – у 201506918 ; заявл. 13.07.2015 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.
10. Пат. UA 88683 МПК (2006) F16F15/00 G01M7/02. Стенд для дослідження в'язко- пружних демпфуючих середовищ, призначених для фінішного фрезерування лопаток моноколес ГТД / Гермашев А.І., Логомінов В.О., Кондратюк Е.В., Мозговий В.Ф., Козлова О.Б. ; заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – у 201312754 ; заявл. 01.11.2013 ; опубл. 25.03.2014.
11. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00 G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логомінов В.О., Гермашев А.І., Дядя С.І., Козлова О.Б. ; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – у 201405981 ; заявл. 02.06.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.
12. Рижов Ю.Е. Оброблюваність титанових сплавів при фрезеруванні із використанням ПНТМ та алмазному хонінгуванні / Ю.Е. Рижов, В.В. Бурикін, С.Л. Абрамова // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. – 2010. – Вип. 9. – С. 113–120.
13. Романов Р.В. Дослідження динамічної поведінки тонкостінних конструкцій при фрезеруванні : магістерська робота / Р.В. Романов. – Київ, 2024. – 115 с.
14. Середенко Б.М. Визначення температури різання при фрезеруванні титанових сплавів торцевими фрезами / Б.М. Середенко, О.А. Заболотний, А.П. Оробченко // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. – 2016. – № 3 (78). – С. 71–75.
15. Сікало М.О. Усунення вібрацій при кінцевому фрезеруванні на верстатах з ЧПК : дис. ... доктора філософії : спец. 05.03.01 / М.О. Сікало. – К., 2024. – 149 с.
16. Технології виготовлення деталей складної форми : навч. посіб. для студ. / Ю.В. Петраков, С.В. Сахань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36525/1/PTF_1.pdf.
17. Зниження регенеративних коливань під час фрезерування маложорстких деталей за рахунок модуляції швидкості головного руху верстата / В.М. Тонконогий, С.А. Зелинський, А.Ж. Ткач, Ю.О. Серебрий // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. – 2016. – № 839. – С. 138–143.

References:

1. Thevenot, V., Arnaud, L., Dessein, G. and Cazenave-Larrochea, G. (2006), «Influence of material removal on the dynamic behavior of thin-walled structures in peripheral milling», *Machining Science and Technology: An International Journal*, Vol. 10, Issue 3, pp. 275–287.
2. Arnaud, L., Gonzalo, O., Seguy, S. et al. (2013), «Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 1–4, pp. 157–166.
3. Vnukov, Yu.M., Hermashev, A.I., Mozghovyi, V.F. et al. (2015), «Oprobuvannia vdoskonalenoї tekhnologii pidhotovky ta nanesennia dempfuiuchoho seredovishcha na monokolesa HTD pry kintsevomu frezeruvanni», *Visnyk dvynobuduvannia*, No. 1, pp. 128–130.
4. Diadia, S.I., Kozlova, O.B., Kushnir, Ye.V. and Karamusha, D.R. (2022), «Doslidzhennia kolyvan pry kintsevomu frezeruvanni ta yikh vplyv na formuvannia obrobenoi poverkhni», *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii i mashynobuduvanni*, No. 2, pp. 71–77.
5. Diadia, S.I., Hermashev, A. and Kozlova, O.B. (2015), «Metody pryhnychennia vibratsii pry frezeruvanni tonkostinnykh detalei», *Tezy dopovidei 12-oho mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi*, 28–29 travnia, Lviv, pp. 83–84.
6. Ishchenko, H.I. (2020), «Tekhnologichne zabezpechennia yakosti vyhotovlennia slozhnoprofilnykh poverkhon turbinykh lopatok z tytanovykh splaviv», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.02.08, Kharkiv, 190 p.
7. Kovryshkin, M.O. and Shevchenko, O.V. (2010), «Metody pidvyshchennia pratsezdatsnosti rizalnoho instrumentu», *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, Issue 23, pp. 298–302.
8. Kozlova, O.B. (2016), «Pryhnychennia reheneratyvnykh avtokolyvan pry frezeruvanni tonkostinnoho elementa detali kintsevomy tsylindrychnomy frezamy», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.03.01, Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t», Kharkiv, 24 p.
9. Diadia, S.I. and Kozlova, O.B. (2015), *Freza z reholovanykh kutamy nakhyly rizalnykh kromok kozhnogo zuba*, Ukraina, MPK (2016.01) V23S 5/00, zaiavnyk ta vlasnyk patentu ZNTU, Pat. UA 104343, u 201506918, zaiavl. 13.07.2015, opubl. 25.01.2016, Biul. No. 2.
10. Hermashev, A.I., Lohominov, V.O., Kondratiuk, E.V., Mozghovyi, V.F. and Kozlova, O.B. (2014), *Stend dlia doslidzhennia viazko-pruzhnykh dempfuiuchykh seredovishch, pryznachenykh dlia finishnoho frezeruvannia lopatok monokolis HTD*, MPK (2006) F16F15/00 G01M7/02, zaiavnyk ta patentovlasnyk Zaporizkyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet, Pat. UA 88683, u 201312754, zaiavl. 01.11.2013, opubl. 25.03.2014.
11. Lohominov, V.O., Hermashev, A.I., Diadia, S.I. and Kozlova, O.B. (2014), *Ctend dlia doslidzhennia kolyvan pry kintsevomu tsylindrychnomu frezeruvanni tonkostinnykh elementiv detalei*, Ukraina, MPK (2006) G01H11/00, G01M7/02, zaiavnyk ta vlasnyk patentu Zaporizkyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet, Pat. UA 94974, u 201405981, zaiavl. 02.06.2014, opubl. 10.12.2014, Biul. No. 23.
12. Ryzhov, Yu.E., Burykin, V.V. and Abramova, S.L. (2010), «Obrobliuvannia tytanovykh splaviv pry frezeruvanni iz vykorystanniam PNTM ta almaznomu khoninhuvanni», *Protsey mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni*, Issue 9, pp. 113–120.
13. Romanov, R.V. (2024), «Doslidzhennia dynamichnoi povedinky tonkostinnykh konstruksii pry frezeruvanni», *mahisterska robota*, Kyiv, 115 p.
14. Seredenko, B.M., Zabolotnyi, O.A. and Orobchenko, A.P. (2016), «Vyznachennia temperatury rizannia pry frezeruvanni tytanovykh splaviv tortsevymy frezamy», *Visnyk NTUU «KPI»*. Seriya. *Mashynobuduvannia*, No. 3 (78), pp. 71–75.
15. Sikalo, M.O. (2024), «Usunennia vibratsii pry kintsevomu frezeruvanni na verstakh z ChPK», D.Sc. Thesis of dissertation, 05.03.01, K., 149 p.
16. Petrakov, Yu.V., Sakhan, S.V., Frolov, V.K. and Korenkov, V.M. (2020), *Tekhnologii vyhotovlennia detalei skladnoi formy, navch. posib. dlia stud.*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 288 p., [Online], available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36525/1/PTF_1.pdf
17. Tonkonohyi, V.M., Zelynskyi, S.A., Tkach, A.Zh., Serebrii, Yu.O. (2016), «Znyzhennia reheneratyvnykh kolyvan pid chas frezeruvannia malozhorstkykh detalei za rakhunok moduliatsii shvydkosti holovnoho rukhu verstata», *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*, Lviv, No. 839, pp. 138–143.

Бойко Ігор Андрійович – кандидат технічних наук, докторант Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0953-1927>.

Наукові інтереси:

- механічна обробка важкооброблюваних матеріалів;
- математичне та комп'ютерне моделювання технічних процесів та систем.

Мельничук Петро Петрович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-0361-756X>.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- технологія машинобудування.

Boiko I.A., Melnychuk P.P.

The use of titanium alloys in the manufacturing of complex-profile components for aircraft engines

Aircraft engine manufacturing involves a wide range of structural materials due to the diverse operating conditions of individual engine components and the stringent requirements for the materials used. One of the most critical elements of an aircraft engine, requiring high precision and quality in the production of its parts and assemblies, is the compressor rotor. The use of titanium alloys is driven by the high rotational speed of the rotor during operation (up to 20,000 rpm) and the need to eliminate negative factors such as vibration, cracking, wear, mechanical damage, corrosion, and fretting. These challenges have led to the widespread adoption of titanium alloys in aircraft engine manufacturing, as they offer high strength, corrosion resistance, and low weight compared to iron-based materials. However, machining titanium alloys is complicated by their low thermal conductivity, high strength, and elasticity. These properties lead to significant vibration during machining, rapid tool wear due to work-hardening of the surface layer, adhesion between the tool and the workpiece, and high thermal loads on the cutting tool. Components affected include blades, spacers, disks, fan wheels, brackets, certain housing parts, and monowheels.

This study analyzes the current state of the issue and key research directions aimed at improving the machinability of thin-walled components made from titanium alloys. It also examines the specific challenges of machining complex-profile surfaces of monowheel-type parts on high-speed machining centers. The research presents findings on reducing regenerative chatter, using damping materials, modulating cutting speed, and selecting optimal tool materials.

The study concludes with an assessment of the prospects and future research directions focused on enhancing the efficiency of cutting processes for complex-profile components made from titanium alloys.

Keywords: titanium alloys; monowheel; complex-profile surface; multi-axis machining; multi-purpose machine tool; hard alloy.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2025.