

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(110).20929

В. О. ГЕРАСИМОВ, В. В. МАРЧУК

*Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна***ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА ОЦІНКА УМОВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВИГЛАДЖУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

На основі аналізу наукових публікацій розглянуто перспективи використання процесу алмазного вигладжування деталей з титанових сплавів. Показано, що ефективною фінішною обробкою для підвищення ресурсу виробів є вигладжування поверхні деталей за рахунок створення поверхні з низькою шорсткістю та залишковими напруженнями тиску у приповерхневому шарі товщиною до 140 – 200 мкм. Досягти такого рівня параметрів якості для титанових сплавів практично неможливо через високі адгезійні властивості титану. Чисельними методами розрахунку показано, що в інтервалі значень коефіцієнту тертя від 0,05 до 0,25 на активній стадії при навантаженні величина нормальних напружень в напрямку вигладжування, практично, не залежить від коефіцієнту тертя. При цьому максимальна величина напружень зсуву на поверхні деталі збільшується в міру збільшення коефіцієнту тертя більше ніж у 3 рази. Це призводить до зменшення залишкових нормальних напружень після вигладжування при збільшенні коефіцієнту тертя та до зменшення межі витривалості матеріалу, а відповідно і ресурсу деталі. Встановлено, що для підвищення ефективності вигладжування сплавів на основі титану необхідно створювати умови зниження коефіцієнту тертя. В роботі запропоновано найбільш ефективні напрямки зменшення коефіцієнту тертя при вигладжуванні титанових сплавів: нанесення фізико-хімічних покриттів на поверхню деталі та керування технологічними режимами процесу вигладжування.

Ключові слова: алмазне вигладжування, деталі газотурбінних двигунів, титанові сплави, напружено-деформований стан, керування коефіцієнтом тертя.

Підвищення надійності та ресурсу виробів є найважливішим завданням сучасного машинобудування. Ці експлуатаційні характеристики визначають загалом ефективність таких виробів машинобудування як літальні апарати та авіаційні двигуни, автомобілі, сільськогосподарська техніка, стволи стрілецької зброї та артилерійських знарядь, комплектуючих виробів машинобудування (втулок, вкладишів, циліндрів) та інших виробів.

Одним з найважливіших напрямів підвищення експлуатаційних характеристик зазначених виробів є використання поверхневого пластичного деформування матеріалу деталей під час виконання низки операцій обробки металів тиском, таких як деформуюче протягування, вигладжування, дробоударна обробка та інші.

В роботах [1–2] наведено комплексний аналіз публікацій та історії розвитку фінішної обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням. Показано, що великий вклад у вивчення операцій пластичного деформування поверхневого шару деталей машин, внесли роботи таких науковців, як: Балтер М.А., Долматова А.І., Євстигнєєва М.І., Кудрявцева І.В., Качана О.Я., Розенберга О.О., Суліми А.М., Тігова В.А., Торбіло В.М., Хворостухіна Л.А., Чепи П.А. і багатьох інших.

Проблема підвищення ефективності процесу вигладжування, в тому числі деталей з титанових сплавів, присвячені роботи закордонних науковців [3–11].

Ефективне формування високих експлуатаційних характеристик деталей і виробів машинобудування на стадії їх виробництва можна забезпечити технологічними методами під час реалізації фінішних операцій ЗМД тільки при комплексному та системному вивченні впливу всіх складових технологічного процесу на параметри якості поверхневого шару матеріалу виробів.

У роботах, залежно від схем реалізації та параметрів технологічних процесів ППД досліджувалися параметри якості поверхневого шару: шорсткість поверхні, зміцнення, залишкові напруження. Як узагальнений параметр якості досліджено підвищення межі витривалості (σ_{-1}), яка є оцінкою ресурсу деталей виробів.

Під якістю поверхні розуміють сукупність характеристик (параметрів) якості: шорсткість, фізико-механічні властивості поверхневого шару, залишкові напруження, ступінь зміцнення та ін.. Класифікацію параметрів якості подано в табл. 1 [1, 3].

Таблиця 1

Класифікація параметрів якості поверхневого шару

Група параметрів	Підгрупа параметрів	Найменування параметрів	Позначення	Одиниці виміру
Нерівності поверхні	Шорсткість	Висота нерівностей	R_z	мкм
		Середнє арифметичне відхилення профілю	R_a	мкм
		Середнє квадратичне відхилення профілю	R_{sq}	мкм
		Крок нерівностей	L_{ii}	мкм
		Радіус округлення западини нерівностей	r_{ii}	мкм
	Хвилястість	Висота хвилястості	$H_{xв}$	мкм
		Шаг хвилястості	$L_{xв}$	мкм
Фізичний стан поверхневого шару	Мікроструктура поверхневого шару	Розміри фрагментів	l_f	мкм
		Розміри блоків	l_{bl}	мкм
		Кут розорієнтування фрагментів	α_f	градуси
		Розміри блоків	α_{bl}	градуси
	Ступінь деформації	Ступінь деформації	e_{zp}	%
		Ступінь деформації шарів	e	%
Механічний стан поверхневого шару	Деформаційне зміцнення металу	Глибина (товщина) зміцненого шару	h_n	мкм
		Ступінь зміцнення металу	u_n	%
	Залишкові напруження	Розподіл залишкових напружень I-го роду	$\sigma_{зал}$	МПа

Тому вивчення загальних особливостей механіки формування параметрів якості поверхневого шару деталей у процесах ЗМД є актуальним науково-прикладним завданням у вирішенні проблеми підвищення ресурсу виробів машинобудування.

Класифікація включає групи параметрів, що характеризують форму (геометрію) поверхні, фізичний та механічний стан поверхневого шару.

Найбільш важливими параметрами якості, які контролюються під час виготовлення деталей, є точність виконавчих розмірів, шорсткість поверхні, твердість поверхневого шару та залишкові напруження, що діють у приповерхневому шарі.

Операції ППД широко використовуються у виготовленні осесиметричних деталей, які мають циліндричні внутрішні та зовнішні поверхні, таких як вали та диски авіаційних двигунів, втулки, вкладиші, циліндри машин, стволи стрілецької та артилерійської гармат та інші. У ряді випадків ці деталі є особливо відповідальними у конструкціях та визначають ресурс та надійність виробів.

В табл. 2. представлена узагальнена класифікація деталей, які мають циліндричні поверхні. У таблиці для типових деталей показано ступінь впливу основних параметрів якості на їх експлуатаційні характеристики.

Таблиця 2

Узагальнена класифікація деталей, що мають циліндричні поверхні

		Геометричні параметри заготовки									
		Відносна довжина L/d									
		<10			10...30			30...100			
Параметри якості	Вимога до поверхневого шару		Відносна товщина стінки заготовки, δ/d								
			<0,1	0,1..0,5	>0,5	<0,1	0,1..0,5	>0,5	<0,1	0,1..0,5	>0,5
	Шорсткість поверхні Ra, мкм	12,5-1,25	-	+	-	-	-	-	+	+	-
		1,25-0,08	+	+	+	-	+	-	-	+	+
		0,08-0,04	-	-	-	+	-	+	-	-	-
	Твердість матеріалу поверхневого шару, HRC	≤ 50	+	+	+	-	-	-	+	+	-
		50...62	+	-	-	+	+	-	-	-	+
		>62	-	-	-	+	+	+	-	-	+
Залишкові напруження в поверхневому шарі	розтягування	-	-	-	+	-	+	-	-	-	
	стискування	+	+	-	+	+	+	-	-	+	
Мікроструктура	розмір зерна	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Типові деталі		Вкладиші підшипників ковзання	Вали ГТД	Циліндри амортизаторів	Втулки напрямних вимірвальних приладів	Стволи стрілецької зброї, вали ГТД	циліндри плунжерних пар	Втулки навісних систем сльгоспашин	Труби підвищеної точності по отвору	Стволи артилерійських систем	

Формування параметрів якості поверхневого шару, зазвичай, проводиться для цих деталей операціями ППД для найбільш відповідальних та навантажених

деталей, до яких відносяться вали газотурбінних двигунів (ГТД) (рис. 1), які працюють в умовах високих частот обертання ($250 \dots 500 \text{ с}^{-1}$) при підвищених температурах. Внаслідок цього, до їх міцності, точності, збалансованості та маси пред'являються високі вимоги. Зміцнювальна обробка валів ГТД, як правило, проводиться алмазним вигладжуванням (АВ), яке є найбільш ефективною фінішно-зміцнювальною обробкою для підвищення межі витривалості. На сьогодні основними матеріалами для виготовлення відповідальних деталей ГТД є сталі та сплави ХН77ТЮР, Х12НМБФ-Ш, 13Х11Н2В2МФ-Ш, 40Х2Н2МА-Ш, отримані вакуумно-дуговим переплавом [2].

Перспективними сплавами в авіадвигунобудуванні на сьогодні є титанові сплави, які більш жароміцні, ніж алюмінієві, а також є більш легкими і корозійностійкими ніж сталь, що відповідає вимогам до авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД).

Деталі з титанових сплавів зосереджені в основному в компресорній частини двигуна (рис. 1), де температура експлуатації не перевищує $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Крім температурного впливу, в процесі експлуатації титанові деталі, особливо роторні (робочі лопатки, диски, моноколеса та інші), зазнають значні статичні і динамічні навантаження.

Загальна тенденція розвитку авіаційних ГТД характеризується постійним зростанням їх ресурсів, що нерозривно пов'язано із збільшенням навантажень на деталі.

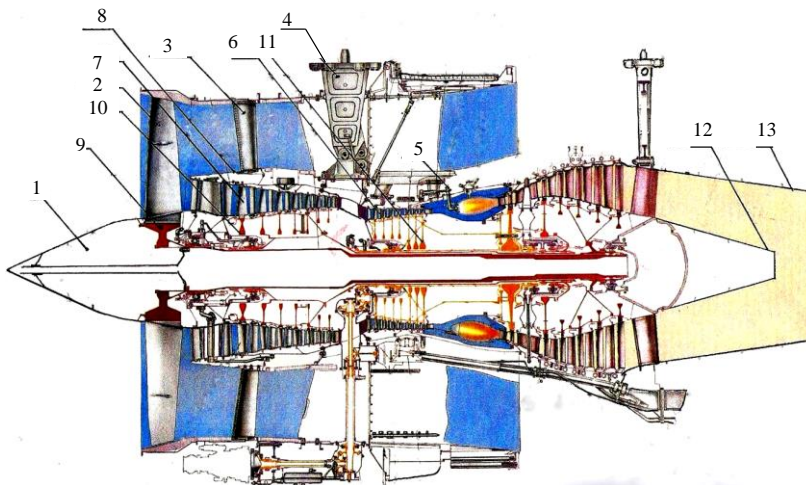


Рис. 1. Схема розташування деталей з титанових сплавів в авіаційному ГТД:

- 1 – носок кока (ОТ4-0); 2 – робоча лопатка вентилятора (ВТ3-1);
- 3 – спрямляючий апарат (ВТ3-1); 4 – тяговий кронштейн (ВТ9);
- 5 – форсунки (ВТ9); 6 – лопатки робочі КВТ (ВТ8, ВТ8М-1);
- 7 – лопатки робочі КНТ (ВТ3-1, ВТ8); 8 – корпус вентилятора (ВТ20);
- 9 – робоче колесо вентилятора (ВТ3-1); 10 – диски КНД (ВТ3-1; ВТ8);
- 11 – диски КВТ (ВТ8, ВТ9, ВТ25У); 12 – стекатель (ВТ20);
- 13 – кожух обдування статора турбіни (ВТ20).

Робочі лопатки компресора – це деталі, що найбільш часто ушкоджуються внаслідок складних умов експлуатації. Робочі лопатки обдуваються повітряним потоком, що рухається з надзвуковою швидкістю. При цьому з повітрям компресор засмоктує також пил і різні тверді фракції. Максимальні статичні напруження в лопатці компресора виникають під дією відцентрової сили і згідно з розрахунковими даними для пера становлять 360 – 370 МПа. Це вимагає від титанових сплавів високої міцності ($\sigma_B = 980 - 1180$ МПа), жароміцності ($\sigma_B^{450} \geq 665$ МПа) і пластичності ($\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 35\%$, $KCU \geq 40$ Дж/см²), які залежать від типу мікроструктури сплаву і пов'язаними з цим механізмами зародження і розвитку тріщини.

Особливе значення для роботи деталей в умовах втомного навантаження відіграє поверхневий шар. Тому деталі з титанових сплавів на фінішному етапі також обробляються методами поверхневого пластичного деформування (ППД).

Лопатки для забезпечення ресурсу вони, як правило, обробляються ППД – віброзмцнювальною обробкою мікрокульками.

Центробіжні колеса та диски з титанових сплавів обробляються вигладжуванням. Вигладжування може бути використане в перспективних конструкціях валів компресора двоконтурних двигунів з титанових сплавів BT22 та BT23.

Однак, вигладжування титанових сплавів має свої особливості.

Під час вигладжування сталей контактна взаємодія інструмент-деталь характеризується малим коефіцієнтом тертя 0,05 – 0,10. Тому процеси протікають стійко, а ефективність вигладжування визначається, як правило, зусиллям вигладжування та формою інструменту. Однак, за алмазного вигладжування ряду металів (титану, цирконію, ніобію, танталу) сили адгезійної взаємодії великі, що виражається в різкому збільшенні сили тертя і налипання частинок оброблюваного металу на робочу поверхню алмазу. Це затрудняє або практично унеможливує алмазне вигладжування таких металів.

Причиною є підвищена схильність титанових сплавів до холодного зварювання з іншими матеріалами. Дане явище є серйозною проблемою, оскільки для її усунення необхідна додаткова обробка поверхні заготовки, застосування відповідних технологічних мастил. Крім того, титанові сплави мають низькі антифрикційні властивості по відношенню до інструментальних матеріалів.

Це підвищує коефіцієнт тертя індентора на поверхні деталі з титану.

В роботі дана оцінка впливу коефіцієнту тертя на величину напружень і деформацій в приповерхневому шарі деталі, що обробляється вигладжуванням, чисельними методами з використанням системи ANSYS.

При моделюванні процесу вигладжування у системі ANSYS було зроблено ряд припущень:

1. Враховуючи симетричність процесу відносно площини XOY, при розрахунку вирішувалась плоска задача. Це забезпечило зменшення часу розрахунку процесу і дозволило отримати максимальну точність розподілу напружень і деформацій у приповерхневому шарі деталі. Розрахункова схема наведена на рис. 2.

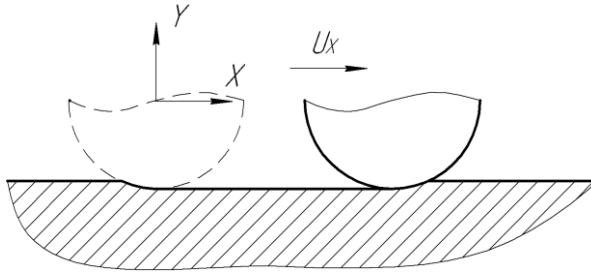


Рис. 2. Розрахункова схема руху сферичного індентора вздовж поверхні деталі

2. При моделюванні рух реалізується шляхом завдання сферичному індентору переміщення U_x . Це відповідало квазидинамічній постановці, тобто у статичній постановці інструменту задавалась не швидкість, а переміщення;
3. Тертя при взаємодії індентора і деталі в зоні контакту задається коефіцієнтом тертя f_{TP} ;
4. Деталь розглядалась як нескінченна пластина, тобто її розміри були на порядок більшими ніж розміри інструменту;
5. Сферичний індентор вважався абсолютно жорстким.

Відповідно для розрахункової схеми було проведено вирішення тестового завдання впровадження сферичного індентора у поверхню деталі для матеріалу Х12НМБФШ.

Залежність зусилля вдавлювання від глибини застосування сферичного наконечника наведено на рис. 3.

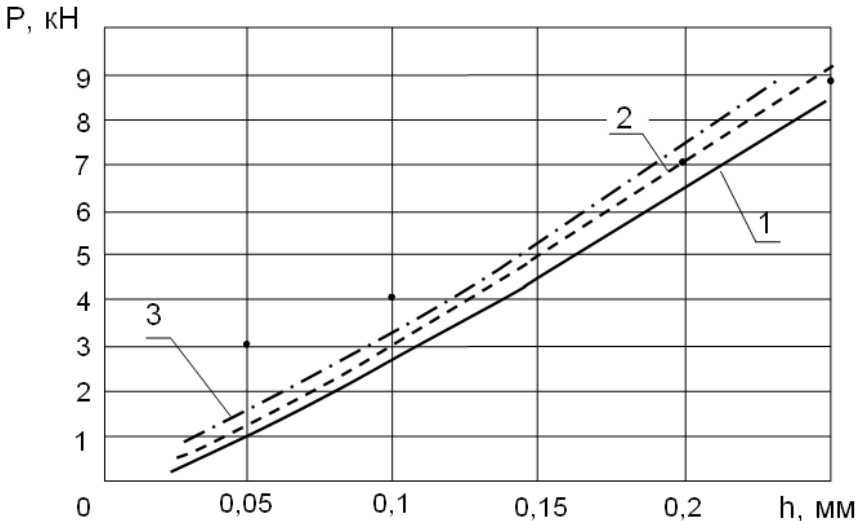


Рис. 3. Залежність зусилля навантаження від глибини вдавлювання сферичного індентора: 1 та 2 – результати розрахунку у роботі [1]; 3 – результати розрахунку в ANSYS у цій роботі

Взаємну похибку обчислень можна пояснити похибками апроксимації діаграми зміцнення матеріалу і можливостями кінцевоелементної розбивки області, що деформується. У системі ANSYS використана реальна діаграма зміцнення, задана таблично. Тому можна припустити, що вона уточнює

розрахунок, описаний кривою 2, оскільки в ньому прийнята апроксимована діаграма зміцнення, що має свою похибку апроксимації.

При цьому взаємна похибка обчислень зусилля в області малих та великих глибин впровадження інструменту не перевищує 12-15%, а в області робочих глибин застосування наконечника при алмазному вигладжуванні за існуючою технологією – не перевищує 10-12%. Це дозволило зробити висновок про коректність поставленої задачі в ANSYS, а також для можливості її використання для розрахунку АВ титанових сплавів.

В роботі виконане дослідження впливу коефіцієнту тертя між індентором та матеріалом деталі на розподіл напружень і деформацій в приповерхневому шарі деталі на активній стадії навантаження, а також після проходження інструмента (розвантаження) для титанового сплаву BT-22.

В процесі розрахунку коефіцієнт тертя f_{TP} задавали в широких межах на п'яти рівнях (0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25)

Аналіз отриманих результатів процесу вигладжування [1] на активній стадії показує, що величина нормальних напружень σ_x , практично не залежить від коефіцієнта тертя між індентором та заготовлею (рис. 4). При цьому на деякій глибині ($h = 0,45$ мм) відбувається зміна знака напружень стиснення на розтяг, величина якого на глибині $h = 1,1-1,2$ мм асимптотично загасає.

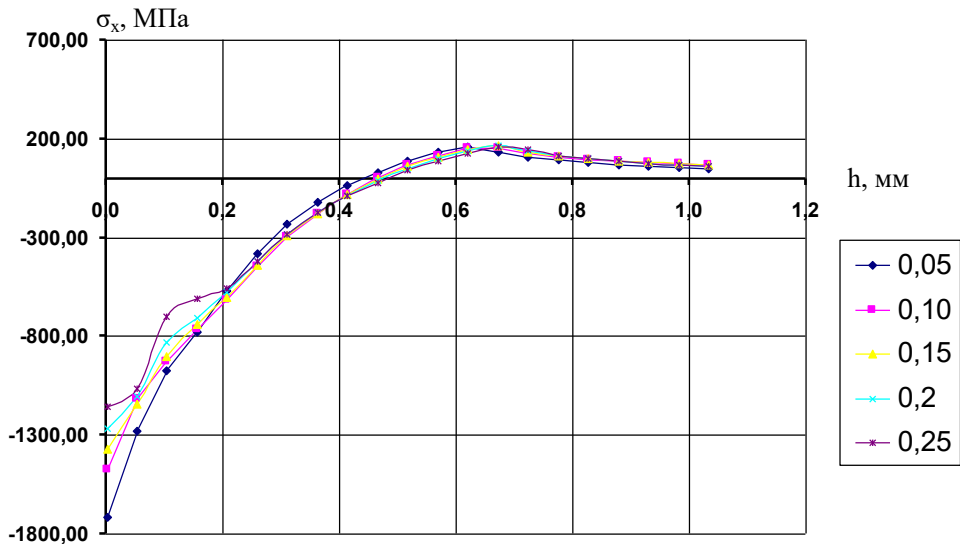


Рис. 4. Розподіл діючих σ_x залежно від глибини h поверхневого шару деталі за різних коефіцієнтів тертя f_{TP}

При цьому на загальний напружено-деформований стан поверхневого шару суттєво впливають дотичні напруження τ_{xy} , які залежать від коефіцієнту тертя f_{TP} (рис. 5).

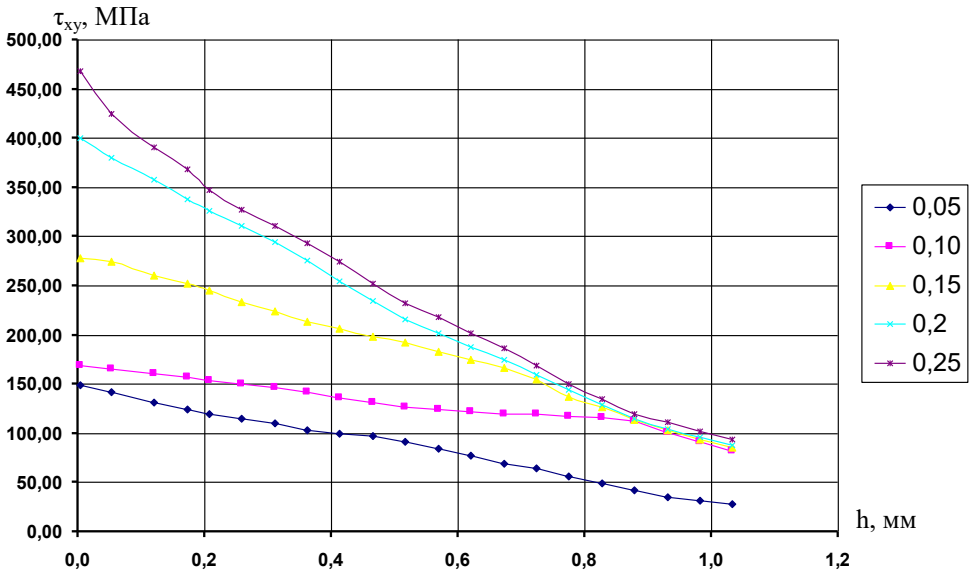


Рис. 5. Розподіл діючих τ_{xy} в залежності від глибини h поверхневого шару деталі при різних коефіцієнтах тертя f_{TP}

Максимальна величина напружень зсуву на поверхні деталі збільшується в міру збільшення коефіцієнта тертя більш, ніж у 3 рази з 150 до 480 МПа. Згасання напружень зсуву відбувається на глибині 1,1 - 1,2 мм. (рис. 5).

Враховуючи, що величина деформацій зсуву пропорційна напруженням зсуву, очевидно, що підвищення коефіцієнта тертя збільшує деформації зсуву. А збільшення деформацій зсуву призводить до виникнення мікротріщин в матеріалі поверхневого шару та до його наступного руйнування.

Розподіл залишкових напружень після проходження інструменту (індентора) по поверхні заготівлі представлено на рис. 6.

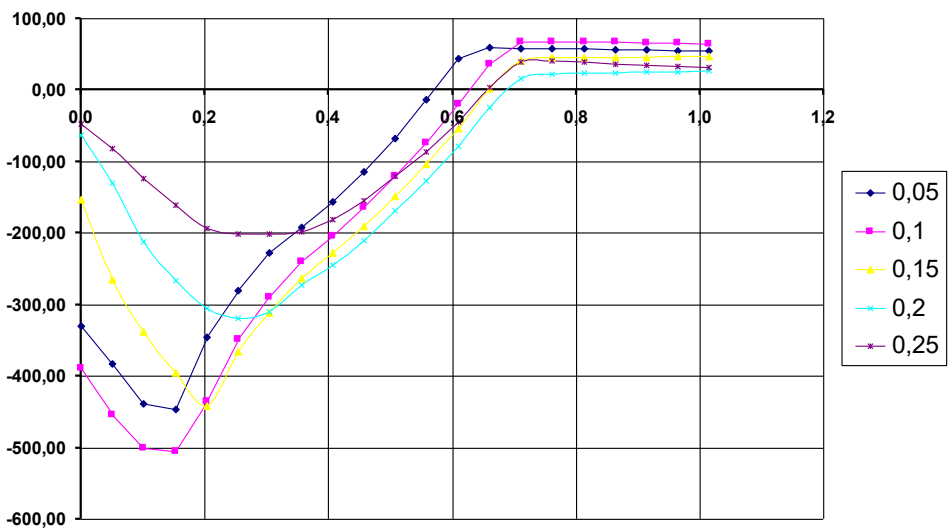


Рис. 6. Розподіл залишкових σ_x залежно від глибини h поверхневого шару деталі при різних коефіцієнтах тертя f_{TP}

Аналіз показує, що нормальні напруження, що діють вздовж поверхні зразка є такими, що стискають і їх максимальна величина на поверхні заготовки зменшується зі збільшенням коефіцієнта тертя. Більшою мірою це проявляється для напруження σ_x (рис. 6), що діє у напрямку руху індентора.

Таке зменшення залишкового напруження σ_x зменшує ефективність АВ, тому, що зменшує межу витривалості матеріалу – σ_L , а відповідно ресурс деталі.

Аналіз отриманих результатів показує, що для підвищення ефективності вигладжування сплавів на основі титану необхідно створювати умови зниження величини коефіцієнту тертя до величини $f_{TP} = 0,05 - 0,01$. Це може бути досягнуто при розділення поверхонь інструменту та деталі мастильним або проміжним матеріалом.

Тому актуальною науково-практичною задачею є забезпечення параметрів якості деталей з титанових сплавів при обробці вигладжуванням в авіадвигунобудуванні.

Основним напрямком (шляхом) вирішення поставленої задачі є керування процесом взаємодії між поверхнями інструменту та деталі. Найбільш ефективні напрямки показані на рис. 7.

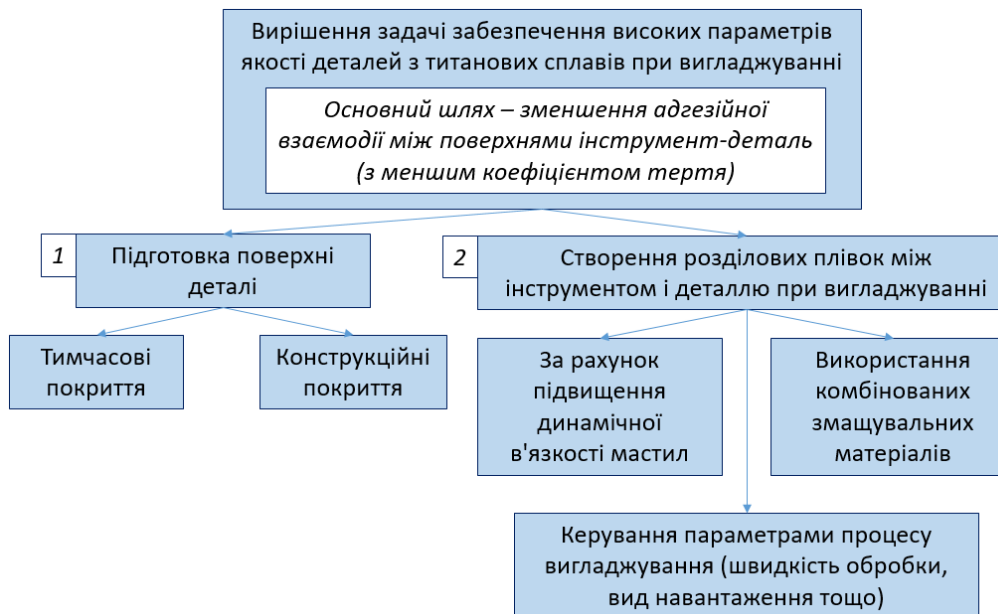


Рис. 7. Найбільш ефективні напрямки забезпечення високих параметрів якості при вигладжуванні деталей з титанових сплавів

На рис. 7 виділені два основні напрямки забезпечення високих параметрів якості при вигладжуванні деталей з титанових сплавів, що обробляються операціями вигладжування на фінішному етапі технологічних процесів виготовлення:

- 1) перший з напрямків може бути реалізований з використанням, як правило, фізико-хімічних методів нанесення покриттів на поверхню деталей. Ці покриття можуть носити такі функціональні властивості:

- конструкційні покриття, які після операції вигладжування зберігаються на поверхні деталі і підвищують її експлуатаційні властивості;
 - тимчасові (технологічні) покриття, які після операцій вигладжування видаляють з поверхні деталі. До цих покриттів обов'язковою вимогою є збереження властивостей міцності обробленої АВ деталі, а також невелика трудомісткість їх видалення;
- 2) другий напрямок зменшення коефіцієнта тертя ґрунтується на керуванні технологічними режимами процесу вигладжування (швидкість та зусилля обробки, вид навантаження тощо. Окремі вимоги ставляться до мастильних матеріалів, які наряду з традиційними маслами (типу I-20), можуть мати підвищену в'язкість, а також реалізувати комбіновані в'язко-пластичні властивості.

Висновки

1. Розглянуто перспективи використання і дана оцінка умов реалізації процесу алмазного вигладжування деталей з титанових сплавів.

2. В результаті аналізу основних параметрів якості та технологічної спадковості показано, що ефективною фінішною обробкою для підвищення ресурсу виробів є вигладжування поверхні деталей за рахунок створення поверхні з низькою шорсткістю та залишковими напруженнями стиску у приповерхневому шарі товщиною до 140 - 200 мкм.

Але при вигладжуванні деталей з титанових сплавів досягти такого рівня параметрів якості практично неможливо через високі адгезійні властивості титану, що підтверджує коефіцієнт тертя між інструментом і поверхнею деталі.

3. Чисельними методами розрахунку досліджено вплив коефіцієнту тертя на формування параметрів якості поверхневого шару. В інтервалі значень коефіцієнту тертя від 0,05 до 0,25 показано, що на активній стадії при навантаженні величина нормальних напружень в напрямку вигладжування, практично, не залежить від коефіцієнту тертя між індентором і заготовкою. При цьому максимальна величина напружень зсуву на поверхні деталі збільшується в міру збільшення коефіцієнту тертя більше ніж у 3 рази. Це призводить до того, що залишкові нормальні напруження після вигладжування зменшуються по величині при збільшенні коефіцієнту тертя та до зменшення межі витривалості матеріалу, а відповідно і ресурсу деталі.

4. Встановлено, що для підвищення ефективності вигладжування сплавів на основі титану необхідно створювати умови зниження коефіцієнту тертя. В роботі запропоновано найбільш ефективні напрямки зменшення коефіцієнту тертя при вигладжуванні титанових сплавів.

Список літератури

1. Теорія та практика обробки металів тиском (Під ред. Богуслаєва В.О., Бобира М.І., Тітова В.А., Качана О.Я.) – Видавн. ВАТ «Мотор Січ», Запоріжжя, 2016 р. – 522 с.
2. Технологія виробництва авіаційних двигунів. Частина III. Методи обробки деталей авіаційних двигунів / В.О. Богуслаєв, О.Я. Качан, В.К. Яценко та інші – Видавн. ВАТ «Мотор Січ», Запоріжжя, 2008 р. – 522 с.

3. Kalin, A., Mariana, I. (2026) Influence of diamond burnishing process parameters on strain-induced α' -martensite in 304 chromium-nickel austenitic stainless steel. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 61, 1, 2026, 191-201 <https://doi.org/10.59957/jctm.v61.i1.2026.22>
4. Kalin, A., Mariana, I., Todorov, V., Daskalova, P (2025) The Effect of Optimised Combined Turning and Diamond Burnishing Processes on the Roughness Parameters of CuZn39Pb3 Alloys *Appl. Sci.* 2025, 15(24), 13075; <https://doi.org/10.3390/app152413075>
5. Maximov J, Duncheva G. Improvements in the Surface Integrity and Operating Behaviour of Metal Components Through Slide Burnishing with Non-Diamond-Based Deforming Elements: Review and Perspectives. *Applied Sciences*. 2025; 15(22):12182. <https://doi.org/10.3390/app152212182>
6. Varga G, Markopoulos AP. Tribological Aspects of Slide Friction Diamond Burnishing Process. *Materials (Basel)*. 2025 Sep 27;18(19):4500. <https://doi.org/10.3390/ma18194500>
7. Nakata K., Okada M., Watanabe H., and Watanabe M. (2025) Surface Finishing Mechanisms of cBN Burnishing Tool Composed of Fine BN Grains for Hardened Die Steel, *Int. J. Automation Technol.*, Vol.19 No.5, pp. 970-979. <https://doi.org/10.20965/ijat.2025.p0970>
8. Lavrys, S.M., Pohrelyuk, I.M., Sheykin, S.Y. et al. The influence of the initial structure of high-strength titanium alloy on surface hardening and roughness after ball burnishing. *Mater Sci* 60, 784–791 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00950-7>
9. Nguyen, T.-T., Le, M.-T., Nguyen, T.-C., Nguyen, T.-A., Dang, X.-B., & Van, A.-L. (2025). Comparison and Optimization of Burnishing Parameters in Various Machining Conditions. *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 71(3-4), 127–135. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2024.1248>
10. Markov, A. (2025). Impact of regular relief patterns on the tribological properties of shaft surface. In *Journal of the Balkan Tribological Association* (Vol. 31, Issue 2, pp. 197–203).
11. Nguyen T-T, Nguyen T-A, Dang X-B, Van A-L. Multi-performance optimization of the diamond burnishing process in terms of energy saving and tribological factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023;238(6):2714-2727. doi:10.1177/09544089231163407

Отримано: 4 лютого 2026

Прийнято: 12 березня 2026

Опубліковано: 9 квітня 2026

Герасимов Володимир Олегович – здобувач вищої освіти третього рівня 1-го курсу ОС «Доктор філософії» спеціальності G9 Прикладна механіка, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, <https://orcid.org/0009-0005-4167-7629>

Марчук В'ячеслав Володимирович – здобувач вищої освіти 2-го курсу ОС «Магістр» спеціальності 275 «Транспортні технології (на повітряному транспорті)», освітньо-професійна програма «Мультимодальний транспорт і логістика», Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: 9001778@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7742-3549>

V. O. GERASYMOV, V.V. MARCHUK

PROSPECTS OF USE AND ASSESSMENT OF CONDITIONS FOR IMPLEMENTATION OF PROCESSES OF BURNISHING OF TITANIUM ALLOY PARTS

Based on the analysis of scientific publications, the prospects of using the process of diamond burnishing of titanium alloy parts are considered. It is shown that an effective finishing treatment for increasing the service life of products is burnishing the surface of parts by creating a surface with low roughness and residual compressive stresses in the surface layer with a thickness of up to 140 - 200 microns. It is practically impossible to achieve such a level of quality parameters for titanium alloys due to the high adhesive properties of titanium. Numerical calculation methods show that in the range of friction coefficient values from 0.05 to 0.25 at the active stage under load, the value of normal stresses in the direction of burnishing practically does not depend on the friction coefficient. At the same time, the maximum value of shear stresses on the surface of the part increases as the friction coefficient increases by more than 3 times. This leads to a decrease in residual normal stresses after burnishing with an increase in the friction coefficient and to a decrease in the endurance limit of the material, and accordingly, the resource of the part. It has been established that to increase the efficiency of burnishing of titanium-based alloys, it is necessary to create conditions for reducing the friction coefficient. The work proposes the most effective directions for reducing the friction coefficient during burnishing of titanium alloys: applying physicochemical coatings to the surface of the part and controlling the technological modes of the burnishing process.

Keywords: diamond burnishing, gas turbine engine parts, titanium alloys, stress-strain state, friction coefficient control.

References

1. Teoriia ta praktyka obrobky metaliv tyskom (Pid red. Bohuslaieva V.O., Bobyria M.I., Titova V.A., Kachana O.Ia.) – Vydavn. VAT «Motor Sich», Zaporizhzhia, 2016 r. – 522 s.
2. Tekhnolohiia vyrobnytstva aviatsiinykh dvyhuniv. Chastyna III. Metody obrobky detalei aviatsiinykh dvyhuniv / V.O. Bohuslaiev, O.Ia. Kachan, V.K. Yatsenko ta inshi – Vydavn. VAT «Motor Sich», Zaporizhzhia, 2008 r. – 522 s.
3. Kalin, A., Mariana, I. (2026) Influence of diamond burnishing process parameters on strain-induced α' -martensite in 304 chromium-nickel austenitic stainless steel. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 61, 1, 2026, 191-201 <https://doi.org/10.59957/jctm.v61.i1.2026.22>
4. Kalin, A., Mariana, I., Todorov, V., Daskalova, P (2025) The Effect of Optimised Combined Turning and Diamond Burnishing Processes on the Roughness Parameters of CuZn39Pb3 Alloys *Appl. Sci.* 2025, 15(24), 13075; <https://doi.org/10.3390/app152413075>
5. Maximov J, Duncheva G. Improvements in the Surface Integrity and Operating Behaviour of Metal Components Through Slide Burnishing with Non-Diamond-Based Deforming Elements: Review and Perspectives. *Applied Sciences.* 2025; 15(22):12182. <https://doi.org/10.3390/app152212182>
6. Varga G, Markopoulos AP. Tribological Aspects of Slide Friction Diamond Burnishing Process. *Materials (Basel).* 2025 Sep 27;18(19):4500. <https://doi.org/10.3390/ma18194500>
7. Nakata K., Okada M., Watanabe H., and Watanabe M. (2025) Surface Finishing Mechanisms of cBN Burnishing Tool Composed of Fine BN Grains for Hardened Die Steel, *Int. J. Automation Technol.*, Vol.19 No.5, pp. 970-979. <https://doi.org/10.20965/ijat.2025.p0970>
8. Lavrys, S.M., Pohrel'yuk, I.M., Sheykin, S.Y. et al. The influence of the initial structure of high-strength titanium alloy on surface hardening and roughness after ball burnishing. *Mater Sci* 60, 784–791 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00950-7>
9. Nguyen, T.-T., Le, M.-T., Nguyen, T.-C., Nguyen, T.-A., Dang, X.-B., & Van, A.-L. (2025). Comparison and Optimization of Burnishing Parameters in Various Machining

Conditions. *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 71(3-4), 127–135. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2024.1248>

10. Markov, A. (2025). Impact of regular relief patterns on the tribological properties of shaft surface. In *Journal of the Balkan Tribological Association* (Vol. 31, Issue 2, pp. 197–203).

11. Nguyen T-T, Nguyen T-A, Dang X-B, Van A-L. Multi-performance optimization of the diamond burnishing process in terms of energy saving and tribological factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023;238(6):2714-2727. doi:10.1177/09544089231163407

Volodymyr Herasymov – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, <https://orcid.org/0009-0005-4167-7629>

Vyacheslav Marchuk – higher education student of the 2nd year of the OS "Master" in the specialty 275 "Transport Technologies (in air transport)", educational and professional program "Multimodal Transport and Logistics", State University "Kyiv Aviation Institute", Lubomyr Huzar Ave., 1, Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 9001778@stud.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-7742-3549>