

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **Інноваційні технології підвищення ресурсу несучих елементів газотурбінних двигунів**

ЛАВРІНЕНКОВ Антон Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів, Механіко-машинобудівного інституту, КПІ ім. Ігоря Сікорського

УЛАНОВ Сергій Олександрович – аспірант кафедри технології авіаційних двигунів, Машинобудівного факультету, Національного університету "Запорізька політехніка"

ЗІЛІНСЬКИЙ Андрій Іванович – асистент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки, Механіко-машинобудівного інституту, КПІ ім. Ігоря Сікорського

РЕФЕРАТ

**Київ – 2021**

Основним завданням сучасного машинобудування в умовах конкуренції є створення продукції з високими експлуатаційними параметрами при одночасному зменшенні маси і збільшенні ресурсу роботи виробу. Цій вимозі повною мірою відповідає продукція авіабудування, яка зважаючи на умови експлуатації повинна відповідати високим стандартам якості і параметрам надійності.

Обробка деталей методами ППД є ефективним засобом підвищення опору втомленості та довговічності деталей газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють в умовах високих циклічних і статичних навантажень.

Ефективним процесом ППД є алмазне вигладжування (АВ). При порівняно невеликих зусиллях процесу і простоті оснащення АВ дозволяє підвищити міцність від втоми за рахунок формування по глибині поверхневого шару залишкових стискаючих напружень, зменшити шорсткість поверхні, підвищити зносостійкість.

Матеріалом, який має малу щільність при високій міцності є титан і сплави на його основі, які знайшли широке застосування в деталях різних вузлів виробів авіабудування, таких як стійкі шасі, силові елементи механізації крила, частини двигуна і т.д.

Підвищення якості обробки деталей ротора компресора ГТД забезпечується в основному на фінішних технологічних операціях їхнього виготовлення. На параметри якості поверхневого шару деталей впливає багато факторів, в тому числі і технологічна спадковість.

В роботі вирішена актуальна науково-практична проблема впровадження інноваційних технологій поверхневої обробки відповідальних деталей газотурбінних двигунів.

**Мета роботи** – впровадження інноваційних технологій підвищення ресурсу несучих елементів газотурбінних двигунів.

*Об'єкт дослідження* - процес ультразвукового вигладжування титанових сплавів з використанням металовмісного мастила та оснащення для його реалізації. Процес обробки деталей ротора компресора ГТД у псевдорозрідженому шарі абразиву. Процеси підвищення параметрів якості робочих лопаток компресора ГТД з урахуванням технологічної спадковості видів обробки та релаксації залишкових напружень.

*Предмет дослідження* - закономірності впливу параметрів контактної взаємодії індентора і деталі з урахуванням металовмісного мастила на формування зміцненого шару деталі з необхідними параметрами якості. Закономірності впливу параметрів обробки деталей у псевдозрідженому шарі абразиву на геометричні параметри та механічні властивості поверхневого шару деталі. Закономірності формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталей ГТД з урахуванням технологічної спадковості. Закономірності релаксації залишкових напружень у приповерхневому шарі в залежності від їхньої температурної експозиції.

*Методи дослідження.* В основу роботи покладено системний аналіз технологічних параметрів процесів поверхневої пластичної деформації деталей, процесу обробки деталей в псевдозрідженому шарі для формування параметрів якості деталей та комплексне експериментальне та теоретичне дослідження їх взаємозв'язку. Для вирішення поставленої задачі взаємодії інструмента з поверхнею деталі використані фундаментальні положення теорії пластичної

течії з описом полів швидкостей руху металу в осередку деформації і паралельним чисельним моделюванням процесу.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Розроблено математичну модель процесу вигладжування, яка описує поле швидкостей переміщення матеріальних часток в осередку деформації з використанням експонентної функції без розривів в області визначення, що дозволило зв'язати параметри процесу деформування поверхні деталі зі швидкістю обробки;

2. Запропонована та експериментально підтверджена модель взаємодії контактуючих поверхонь інструменту (індентор) і деталі при вигладжуванні з використанням металовмісного мастила, відповідно до якої рух інструменту уздовж поверхні деталі реалізується по проміжному шару мікрочастинок металевої фази мастила в місцях контакту нерівностей поверхонь і по рідинній подушці з гідростатичним підпором на ділянках впадин нерівностей поверхонь;

3. Шляхом комп'ютерного моделювання взаємодії сферичної частинки, яка рухається зі швидкістю більше 1000 м/с, з криволінійною поверхнею деталі встановлені закономірності цієї взаємодії для випадків різних конструкційних матеріалів;

4. Проведено розрахунок напівхвильового ультразвукового вібраційного приводу для вигладжування деталей з додатковим ультразвуковим впливом.

5. Експериментально, а також в результаті чисельного моделювання, показано, що додаткове навантаження інструменту поздовжньо-крутильними ультразвуковими коливаннями при вигладжуванні титанових сплавів дозволило зменшити шорсткість поверхні деталі і збільшити величину залишкових напружень стиску в поверхневому шарі в порівнянні з вигладжуванням з поздовжніми ультразвуковими коливаннями;

6. Вперше експериментально встановлені закономірності залежності зняття різних матеріалів з оброблюваної поверхні від швидкості деталі, зернистості і марки абразивного зерна, а також зношування абразивного зерна від швидкості деталі та від її положення по висоті шару зерна, що дозволило визначити значення основних параметрів процесу обробки дисків у псевдозрідженому шарі абразиву.

7. Вперше експериментально встановлені умови і режими обробки, а також зміна геометричних розмірів конструктивних елементів поверхні дисків ротора компресора з титанових і жароміцних сплавів після їхньої обробки в псевдозрідженому шарі абразиву.

8. Експериментально встановлено, що після обробки дисків ротора компресора в псевдозрідженому шарі абразиву мікротвердість поверхневого шару не змінюється, максимальна залишкова напруження стиску становить 300...450 МПа, довговічність підвищується в 2,5...3 рази, а для дисків зі збільшеним радіусом викружки паза, яка дорівнює  $R = 2,0$  мм, довговічність підвищується в 5...6 разів у порівнянні з серійним варіантом обробки.

Живучість дисків становить від 41 % до 77,8 % від повної довговічності, а довговічність до руйнування міжпазових виступів дисків IV і V ступенів КВТ становить 3700 циклів.

9. Вперше експериментально встановлено, що обробка дисків ротора КВТ у псевдозрідженому шарі абразиву в складі барабана із застосуванням

повітряних сопел призводить до збільшення довговічності дисків IV ступеня в 2,2 рази при температурі випробування, яка дорівнює 400 °С, у порівнянні з обробкою без сопел, а низькотемпературний відпал барабана при температурі 550 °С є кращим.

10. Вперше встановлені закономірності аналітичного визначення глибини зміцнюючого шару, залишкових напружень розтягу і глибини вторинного пластично деформованого шару від інтенсивності залишкової деформації поверхневого шару, з похибкою визначення числових значень, що не перевищує 7,0 %, при порівнянні з експериментальними даними, що дозволило визначити оптимальну глибину зміцненого шару, відповідну до заданої інтенсивності деформації поверхневого шару та цілеспрямовано встановлювати параметри процесу дробоударної двосторонньої обробки тонкостінних деталей, що забезпечує необхідне значення параметрів поверхневого шару.

11. Експериментально встановлені закономірності розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі пера робочих лопаток компресора з титанового сплаву після застосування різних технологічних методів обробки з урахуванням прояву їх технологічної спадковості, де термообробка та зміцнюючі методи є ефективним засобом для зниження і нейтралізації розтягувальних залишкових напружень.

12. Експериментально встановлений ступінь збільшення межі витривалості після віброзміцнення від комплексного впливу параметрів якості поверхневого шару пера лопатки, а також показано, що віброполірування і УЗЗ робочих лопаток з титанового сплаву значно підвищують комплекс значень параметрів якості їх поверхневого шару, причому максимальний коефіцієнт підвищення границі витривалості робочих лопаток з титанового сплаву після УЗЗ досягає 1,4, а з жароміцного сплаву – 1,26.

13. Експериментально встановлені закономірності впливу часу ультразвукового зміцнення і наступної термоекспозиції зразків з титанового сплаву на максимальну величину залишкових напружень стиску і глибину їх поширення в поверхневому шарі поверхні, яка зміцнюється.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. На основі розроблених та обґрунтованих теоретичних і чисельних моделей процесу вигладжування створено алгоритми для розрахунків енергосилових параметрів і напружено-деформованого стану поверхневого шару в процесі вигладжування, що дозволяє призначити оптимізовані режими обробки конструкційних матеріалів для забезпечення ресурсу виробів.

2. Отримані аналітичні закономірності, що дозволяють встановити параметри процесу дробоударної двосторонньої обробки тонкостінних деталей, для забезпечення необхідних значень параметрів поверхневого шару

3. Розроблена методика розрахунку резонансних елементів конструкції приводів ультразвукових випромінювачів для поверхневого пластичного деформування.

4. Для вигладжування розроблена та виготовлена УЗ установка поздовжньо-крутильних коливань для УЗ навантаження інструменту, яка дозволяє керувати параметрами швидкості обробки і кінематикою взаємодії інструменту з деталлю для забезпечення параметрів якості поверхневого шару деталі.

5. Розроблено технологічний метод обробки деталей ГТД, відповідно до якого шар нерухомого абразивного зерна за рахунок подач під нього потоку повітря переводять у псевдозріджений (рухливий) стан.

6. Розроблено нові конструкторсько-технічні рішення щодо інтенсифікації процесу вигладжування циліндричних деталей.

7. Розроблені технічні рекомендації з реалізації процесу УЗ вигладжування титанових сплавів. Результати роботи впроваджені на ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» ім. О.Г. Івченка та АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя).

**У першому розділі** розглянуто сучасний стан розвитку методів фінішної обробки поверхні деталей ГТД для підвищення їх параметрів якості.

Вали, диски і робочі лопатки базового двигуна «Д-36» відрізняються великою різноманітністю форми поверхонь, геометричних розмірів і матеріалів. Загальним для всіх деталей є висока точність виготовлення елементів пазів і хвостовиків та інших поверхонь, що сполучаються з ними. Підвищена якість обробки деталей ротора компресора забезпечується в основному на фінішних технологічних операціях їхнього виготовлення.

Для кожної групи деталей наведені способи їхньої обробки на фінішних технологічних операціях. Вали компресора високого тиску (КВТ) - рекомендується обробляти в псевдозрідженому шарі абразиву (ПША) одночасно із двох сторін. Диски компресора найбільше ефективно можуть бути оброблені в ПША. Робочі лопатки компресора рекомендується обробляти віброабразивним методом. Диски й робочі лопатки компресора для підвищення ресурсу рекомендується зміцнювати сталевими кульками в ультразвуковому полі (УЗЗ) у сполученні з раніше зазначеними способами їхньої фінішної обробки. Вали компресора низького тиску (КНТ) найбільше ефективно можуть бути оброблені алмазним вигладжуванням

Обробка деталей у псевдозрідженому (рухливому) шарі абразиву відбувається за рахунок перетворення шару зернистого матеріалу в псевдогомогенну систему під впливом зрідженого агента (газу або рідини).

При алмазному вигладжуванні сплавів на основі титану виникають труднощі пов'язані з їх високими адгезійними властивостями та низькою теплопровідністю, які можна подолати за рахунок керування умовами взаємодії інструменту та деталі на контактній поверхні, наприклад при УЗ вигладжуванні.

Важливе значення в обробці вигладжуванням має тип мастила. Застосування мастил з добавками ультрадисперсних або нанопорошків різних матеріалів в парах тертя знижує коефіцієнт тертя за рахунок зменшення адгезійної складової тертя.

**В другому розділі** проведено теоретичний аналіз процесів поверхневої пластичної обробки.

Отримані закономірності формування параметрів поверхневого шару тонкостінних деталей від інтенсивності залишкової деформації при їх зміцнювальній обробці. Розглядається одночасна двостороння дробоударна обробка деталей типу пластин і тонкостінних циліндричних оболонок (наприклад, лопаток ГТД, тонкостінних валів і т.д.). При обробці таких деталей

дробом деформований стан є асиметричний ( $\epsilon_x^{3al} = \epsilon_y^{3al}$ ;  $\epsilon_i^{3al} = \epsilon_\theta^{3al}$ ), а напружене – плоским всебічно рівно-напруженим ( $\sigma_x^{3al} = \sigma_y^{3al}$ ;  $\sigma_z^{3al} = 0$  для пластин, причому напруження  $\sigma_x^{3al} = \sigma_y^{3al}$  діють у площинах, паралельних оброблюваній;  $\sigma_i^{3al} = \sigma_\theta^{3al}$ ;  $\sigma_r^{3al} = 0$  – для циліндричних тонкостінних деталей). Збільшення  $\epsilon_{ioz}$  і зниження  $h_T$  забезпечується підвищенням початкової швидкості  $V_0$  удару робочого середовища та одночасним зниженням її розмірів (діаметра  $D$ ). Запропонована інженерна методика розрахунку параметрів дробоударної обробки (швидкості  $V_0$ , діаметра  $D$  дробу, часу  $t$  обробки), що забезпечують задані інтенсивність деформації  $\epsilon_{ioz}$  поверхневого шару та глибину  $h_{opt.T}$  зміцнення.

Запропоноване рішення дозволяє аналітично визначити оптимальну глибину зміцненого шару, що відповідає заданій інтенсивності деформації поверхневого шару (заданого ступеня зміцнення) і дозволяє цілеспрямовано регулювати параметри процесу дробоударної двосторонньої обробки деталей ( $V_0, D, t$ ), що забезпечують необхідні значення  $\epsilon_{ioz}$  та  $h_{opt.T}$ .

Проведено кількісний аналіз точності аналітичного визначення глибини зміцненого шару по відомим, а також по запропонованим аналітичним залежностям при статичних методах зміцнювальної обробки.

Запропонована розрахункова модель контактної взаємодії інструменту з поверхнею деталі при вигладжуванні з металовмісним мастилом (масло+мікропорошок пластичного матеріалу) (рис. 1), яка враховує наявність пластичного проміжного шару, а також виконано теоретичний аналіз процесу пластичного деформування поверхневого шару деталей вигладжуванням.

Опис кінематики, визначення НДС і енергосилових параметрів процесу деформування виконано з використанням замкнутої системи рівнянь суцільних середовищ.

Швидкість переміщення матеріальних частинок в осередку деформації поверхневого шару деталі при вдавлюванні індентора описані експонентною функцією, яка, на відміну від раніше використовуваних функцій, не має розривів в області визначення і дозволяє оптимізувати параметри глибини розповсюдження деформації і форми позаконтактної зони. Графічно поле осьових і радіальних швидкостей переміщень показано на рис. 2.

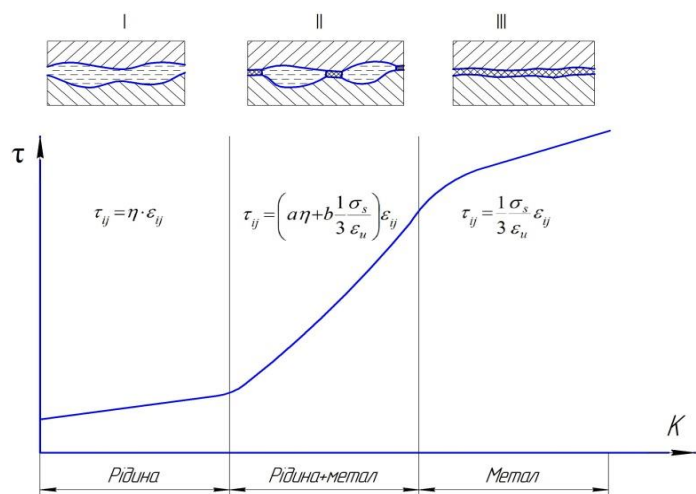


Рис. 1. Розрахункова модель залежності напруження зсуву від виду контакту на поверхні "інструмент-деталь"

В процесі руху індентора уздовж поверхні деталі вважали, що між індентором і матеріалом деталі є проміжний шар пластичного металу, який нерозривно зв'язаний з основним матеріалом. Вважаємо також, що деформації зсуву проходять в проміжному шарі товщиною  $\delta_0$ , і поверхневому шарі металу

деталі глибиною  $h$  (рис. 3). Прийнято також припущення, що максимальна глибина поширення деформацій зсуву металу деталі дорівнює глибині осередку деформацій  $h$  при вдавлюванні індентора.

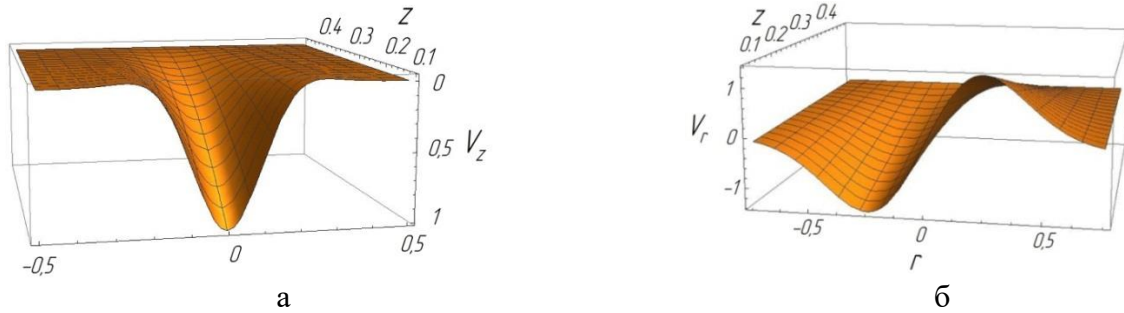


Рис. 2. Складові швидкостей переміщень: осьові (а) і радіальні (б)

Величину питомої роботи деформування визначали залежністю

$$a_{y\partial} = \iiint_{t r z} \sigma_i \varepsilon_i dz dr dt \quad (1)$$

Величина швидкостей переміщень в шарах 1 і 2 має різну величину і визначається механічними властивостями металів цих шарів. При цьому зважаючи на прийняту гіпотезу про прилипання металевих частинок шару мастила 2 до поверхні деталі, вважаємо, що швидкості зсуву на межі поверхневого 1 і проміжного 2 шарів рівні. Величина ж цих швидкостей переміщень по шарам різна.

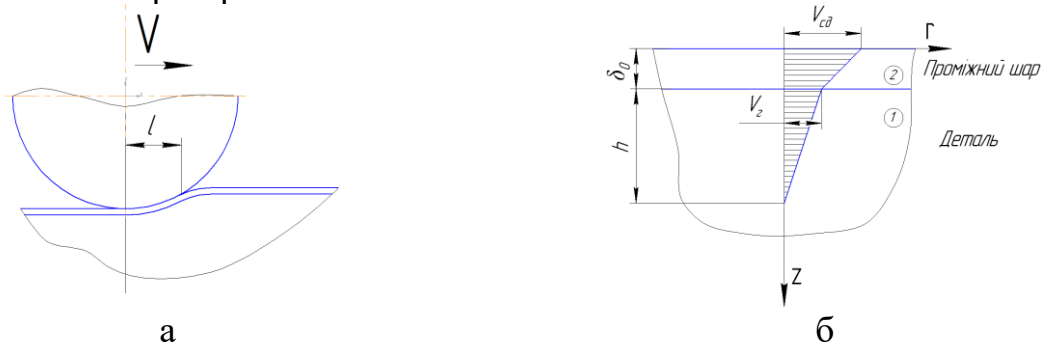


Рис. 3. Схема процесу вигладжування деталі при наявності проміжного металевого шару між індентором і деталлю: а - схема вигладжування; б - розподіл радіальної компоненти вектора швидкості переміщення поверхневого шару (1) деталі і проміжного (2) шару

Враховуючи енергетичні умови спільної деформації на граничній поверхні шарів 1 та 2, а також з використанням балансу потужностей взаємодії індентору та проміжного шару 2 отримана величина швидкості переміщень при зсуві на граничній поверхні

$$V_2 = \sqrt{3} f_{mp} \frac{\sigma_{s2} \delta_0}{\sigma_{s1} h + \sigma_{s2} \delta_0} V, \quad (2)$$

де  $f_{mp}$  - коефіцієнт тертя на контактній поверхні.

Поле швидкостей переміщень матеріальних частинок компонент вектора зсуву (3) поверхневого шару деталі з врахуванням (2).

На рис. 4 представлені залежності швидкості деформацій зсуву  $\varepsilon_{rz}$  поверхневого шару деталі.

$$\begin{aligned}
 V_{cr1} &= \sqrt{3}Vf_{mp} \frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h} \left[ 1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right] \left( 1 - \frac{r}{l} \right); \\
 V_{c\theta 1} &= \sqrt{3}Vf_{mp} \frac{\sigma_{s2}h}{\sigma_{s1}\delta_0 + \sigma_{s2}h} \left( 1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right) \left( \left( \frac{2r}{l} - 1 \right) \theta + \frac{\pi}{2} \right); \\
 V_{cz} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

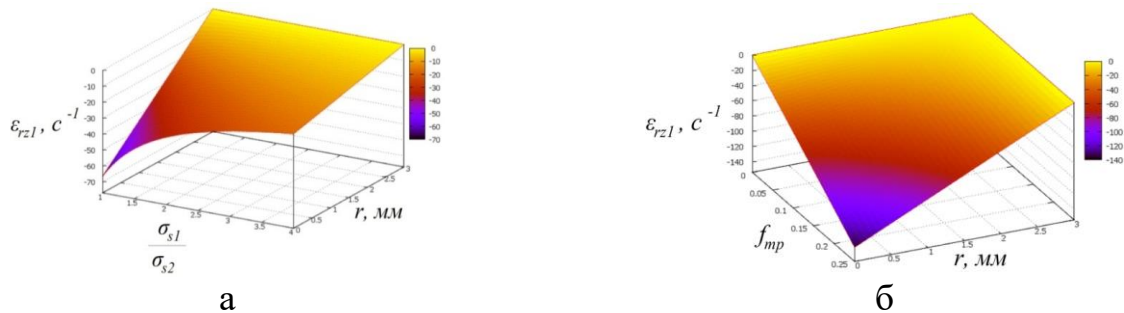


Рис. 4. Залежність швидкості деформацій зсуву  $\varepsilon_{rz1}$  основного шару в залежності від:  
 а – відношення  $\sigma_{s1}/\sigma_{s2}$ ; б - коефіцієнта тертя  $f_{mp}$

В роботі представлена узагальнена математична модель процесу вигладжування, рівняння якої повністю описують деформування поверхневого шару при вигладжуванні з урахуванням тертя і наявності проміжного металевих пластичного шару.

В третьому розділі приведено результати чисельного моделювання з використанням CAD/CAE системи Abaqus процесу вигладжування з додатковим УЗ навантаженням інструменту і без УЗ навантаження (рис. 5), процесу вигладжування без УЗ навантаження з урахуванням наявності проміжного шару між поверхнями індентора та деталі.

Час, що моделюється  $t=0,006$  с, радіус індентора  $r=3$  мм, швидкість обробки деталі  $V=250$  мм/с, частота коливань  $f=21$  кГц, амплітуда коливань відносно поверхні: поперечних  $U_y=8$  мкм, поздовжніх  $U_x=8$  мкм.

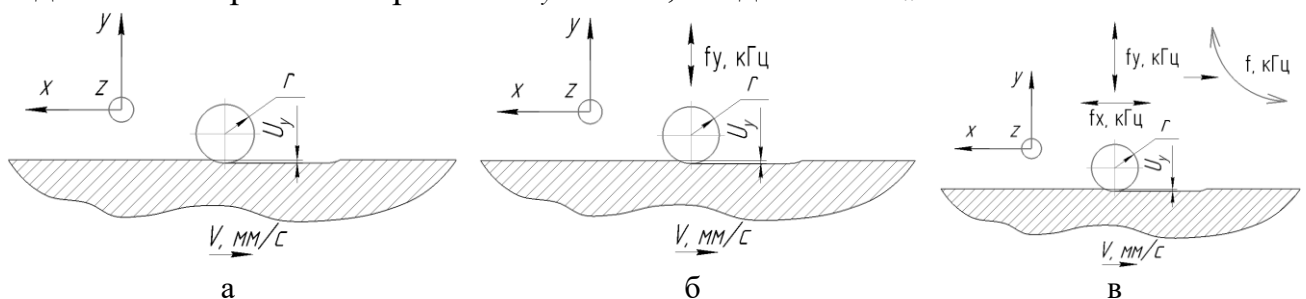


Рис. 5. Розрахункові схеми процесів:  
 а - вигладжування без УЗ коливань індентора; б - вигладжування з УЗ поперечними коливаннями індентора; в - вигладжування з УЗ поздовжньо-поперечними коливаннями

Чисельне моделювання процесу проводилося для різних коефіцієнтів тертя від 0 до 0,15.

Встановлено, що при мінімальних коефіцієнтах тертя до  $f = 0,08$  в поверхневому шарі формуються залишкові напруження стиску з максимумом для  $\sigma_z$  до 70-80 МПа, а для  $\sigma_x$  до 150 МПа на глибині 0,10-0,12 мм. Зі збільшенням коефіцієнта тертя від 0,08 до 0,3 відбувається зменшення максимальних значень залишкових напружень стиску на 25-28% (рис. 6, 7).



В приповерхневому шарі глибиною до 5-15 мкм виникають залишкові напруження розтягу  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$ . Величина їх збільшується із збільшенням коефіцієнта тертя, як показує теоретичний аналіз – за рахунок збільшення деформацій зсуву  $e_{xy}$  в площині  $XOY$  (площині руху інструменту).

При використанні додаткового УЗ навантаження з поперечними коливаннями індентора показано, що в приповерхневому шарі зменшується величина залишкових напружень розтягу на 40-60%. Це свідчить, що додаткове УЗ навантаження дозволяє зменшити деформацію зсуву в приповерхневому шарі на 10-15%.

При вигладжуванні з додатковим навантаженням з поздовжньо-поперечними УЗ коливаннями (УЗК) відбувається збільшення величини напружень стиску  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$  до 170-220 МПа зі зменшенням глибини їх залягання до 0,08-0,1 мм (рис. 8, 9). В приповерхневому шарі розтягуювальні напруження  $\sigma_x$  зменшуються в 2,5-3,0 рази і досягають значень напружень стиску до 50 МПа. Це виникає за рахунок зменшення деформації зсуву  $e_{xy}$  навіть при великих коефіцієнтах тертя.

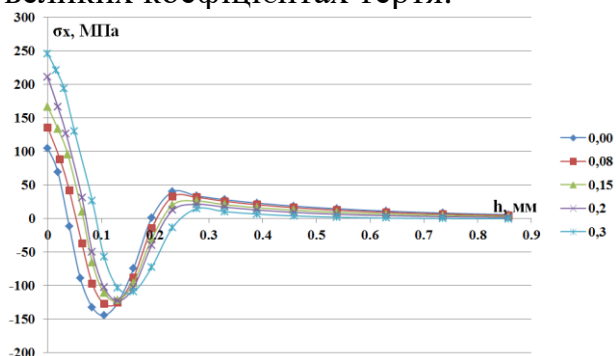


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_x$  при вигладжуванні без УЗК при різних коефіцієнтах тертя

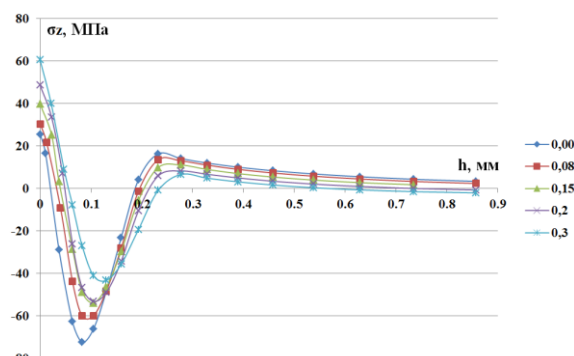


Рис. 7. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_z$  при вигладжуванні без УЗК при різних коефіцієнтах тертя

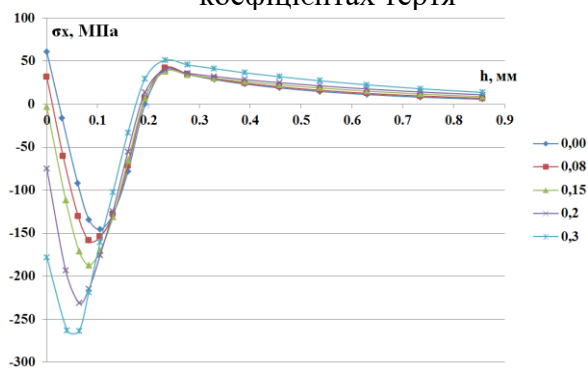


Рис. 8. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_x$  при вигладжуванні с поздовжньо-поперечними УЗК при різних коефіцієнтах тертя

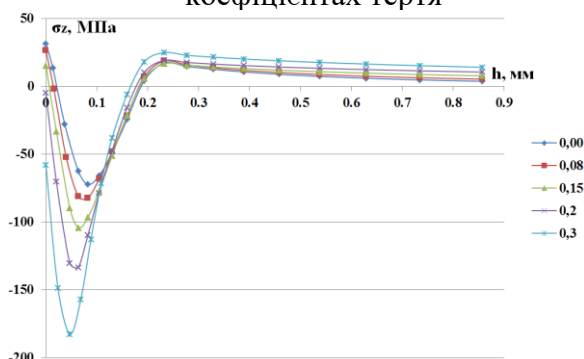


Рис. 9. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_z$  при вигладжуванні с поздовжньо-поперечними УЗК при різних коефіцієнтах тертя

В результаті моделювання вигладжування із проміжним пластичним шаром встановлено: максимальна величина залишкових напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_z$ , практично не змінюється по відношенню до вигладжування без проміжного шару і знаходиться на глибині 0,12...0,13 мм; зі зростанням величини  $\sigma_{T1}/\sigma_{T2}$

(межі плинності основного металу та проміжного шару) зменшується напруження розтягу в приповерхневому шарі (глибиною 5-15 мкм) (рис. 10, а).

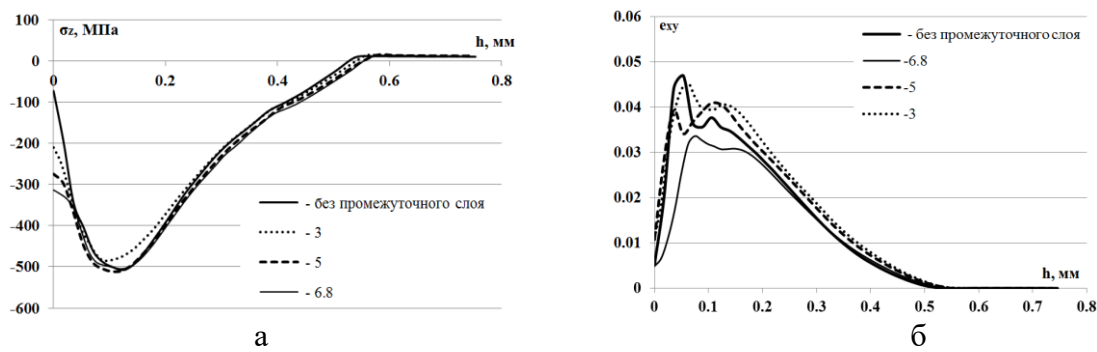


Рис. 10. Розподіл залишкових напружень  $\sigma_z$  (а) та активних деформацій  $e_{xy}$  (б) по глибині поверхневого шару при різних співвідношеннях  $\sigma_{T1}/\sigma_{T2}$

Вже при  $\sigma_{T1}/\sigma_{T2} = 3$  на поверхні деталі діють стискаючі напруження 200 МПа, а при  $\sigma_{T1}/\sigma_{T2} = 6,8$  їх величина складає до 320 МПа; зі зростанням співвідношення  $\sigma_{T1}/\sigma_{T2}$  зменшується максимальна величина активних деформації зсуву  $e_{xy}$  в поверхневому шарі деталі на 25-30% (рис. 10, б). Це співпадає з результатами теоретичних досліджень.

Встановлено, що використання проміжного пластичного шару при вигладжуванні дозволяє виконувати процес з підвищеними силовими режимами, що забезпечує більш високу деформацію поверхневого шару.

У четвертому розділі проведено моделювання ударної взаємодії частинки сферичної форми з деталлю при ультразвуковому навантаженні.

У якості матеріалу для виготовлення деталі обрано зразки з сталі 12X18H10T. Для моделі частинки використовувались частинки Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сферичної форми діаметром 10мкм та 100мкм. Для розглянутих в дослідженні чотирьох розрахункових схем з різними типами матеріалів деталі швидкість двох видів частинок дорівнювала 2000 м/с.

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвукових швидкостях з нерухомою поверхнею, перевищують межі міцності досліджених конструкційних матеріалів.

В п'ятому розділі на підставі даних чисельних розрахунків визначені параметри конструкції концентратора УЗ поздовжньо-крутильних коливань для проведення експериментального дослідження впливу кінематики руху індентора при вигладжуванні деталі на параметри якості поверхні деталі.

З використанням системи автоматизованого проектування ультразвукових вібраційних приводів (САПУВП) КПІ ім. Ігоря Сікорського були розраховані виконавчі розміри півхвильового вібраційного приводу поздовжніх коливань для алмазного ультразвукового вигладжування.

Проектування параметрів концентратора УЗ поздовжньо-крутильних коливань, які створюються за рахунок виготовлення концентратору з діагональними прорізами (Патент України №80361) або гвинтовими канавками, виконувалось чисельним моделюванням з використанням САД/САЕ системи Abaqus.

Для отримання поздовжньо-крутильних коливань інструменту в якості основи використовувався півхвильовий вібраційний привід поздовжніх коливань, до якого кріпився концентратор поздовжньо-крутильних коливань з гвинтовими канавками та діагональними канавками.

За параметрами концентратора, що отримані в результаті чисельного моделювання (рис. 11, 12), був виготовлений концентратор поздовжньо-крутильних коливань (рис. 13), за допомогою шпильки з'єднаний з півхвильовим приводом поздовжніх коливань (рис. 14).

Резонансна частота хвилеводу поздовжньо-крутильних коливань отримана при моделюванні склала 22191 Гц проти реальної частоти 21900 Гц.

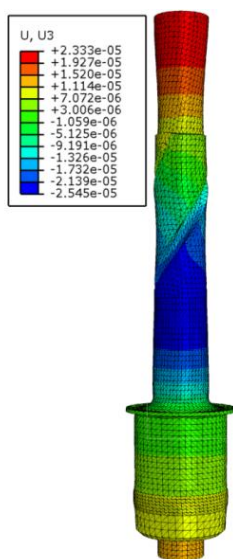


Рис.11. Розподіл амплітуди коливань приводу поздовжньо-крутильних коливань

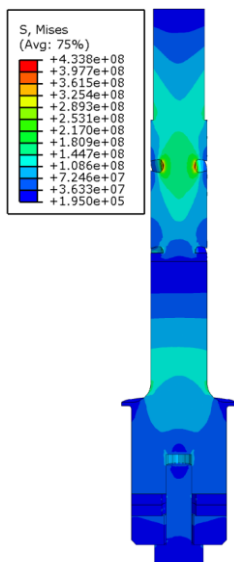


Рис. 12. Розподіл інтенсивності напружень в приводі



Рис. 13. Концентратор поздовжньо-крутильних коливань



Рис. 14. УЗ установка для вигладжування

**В шостому розділі** виконано експериментальне дослідження особливостей формування поверхневого шару при УЗ вигладжуванні титанових сплавів. Експериментальне дослідження формування поверхневого шару деталі при УЗ вигладжуванні складалося з 3-х етапів: УЗ вигладжування с поздовжніми коливаннями індентору; УЗ вигладжування з поздовжніми коливаннями індентору з використанням металовмісних мастил; УЗ вигладжування з поздовжньо-крутильними коливаннями індентора.

Встановлено, що найбільший вплив на шорсткість поверхні деталі становить швидкість обробки і подача інструменту. Рекомендована швидкість обробки при УЗ вигладжуванні титанових сплавів з мінімальною подачею  $s=0,05$  мм/об  $V=10-11$  м/хв, яка забезпечує отримання параметра шорсткості  $R_a=0,01-0,04$  мкм (рис. 15).

Діапазон подач  $s=0,05-0,1$  мм/об, забезпечує отримання параметра шорсткості  $R_a=0,01-0,06$  мкм. При подальшому збільшенні швидкості обробки до  $V=30-32$  м/хв і подачі відбувається формування мікрОВИРИВІВ і задиРІВ (рис. 16). При збільшенні статичного зусилля з 50 Н до 100 Н шорсткість практично не змінюється і коливається в межах 0,01 мкм.

Режими обробки деталі перед УЗ вигладжуванням впливають на шорсткість поверхні після УЗ вигладжування. При УЗ вигладжуванні поверхні, яка була проточена з подачею 0,15 мм/об, шорсткість зменшується в 9 разів менше, ніж при УЗ вигладжуванні поверхні, отриманої точінням з подачею 0,05 мм/об, з 1,6 мкм до 0,14 мкм і з 4,1 мкм до 0,023 мкм відповідно.

Металографічні дослідження поверхневого шару показали, що при УЗ вигладжуванні відбувається значне подрібнення блоків кристалічної структури зерна на глибину до 100 мкм, максимум подрібнення спостерігається у поверхні зразка на глибині 2-6 мкм.

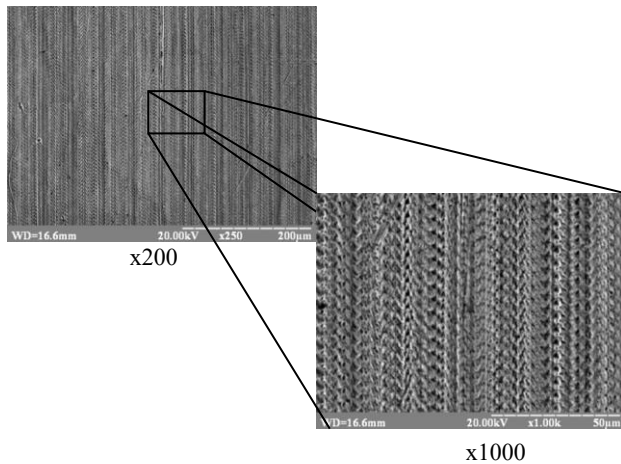


Рис. 15. Фактура поверхні при швидкості обробки  $V = 4,3$  м/хв

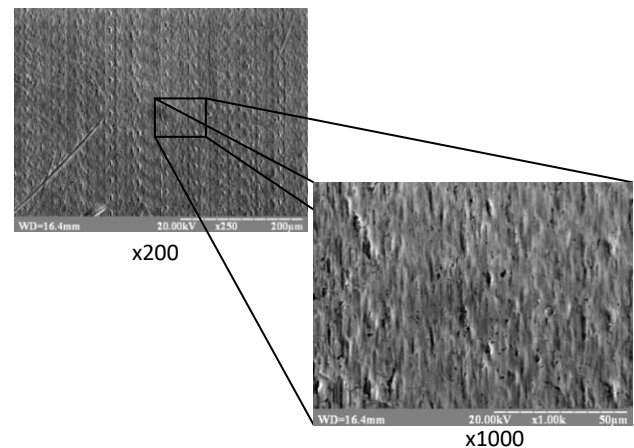


Рис. 16. Фактура поверхні при швидкості обробки  $V = 31,65$  м/хв

Встановлено, що обробка УЗ вигладжуванням дозволяє збільшити мікротвердість в приповерхневому шарі в 1,5-1,8 рази на глибину до 0,6 мм з 255-260 HV до 322-350 HV. Максимальне значення відповідає поверхні зразка.

Експериментально досліджено використання металовмісних мастил при УЗ вигладжуванні. В якості металевго наповнювача використовувалися мікропорошки міді й алюмінію дисперсністю 5-10 мкм. Вплив металовмісних мастил на параметри якості поверхневого шару проявляється при швидкостях обробки 21 м/хв і вище. При даних швидкостях за рахунок збільшення в'язкості мастила, в порівнянні з маслом И20, між індентором і поверхнею деталі в момент деформування знаходиться шар пластичного металевго наповнювача, в результаті чого зменшується адгезійна складова тертя, що дозволяє отримати більш рівномірну фактуру поверхні, у порівнянні з УЗ вигладжуванням з маслом И20, де чітко видно сліди вдавлювання індентора в поверхню деталі (табл. 1).

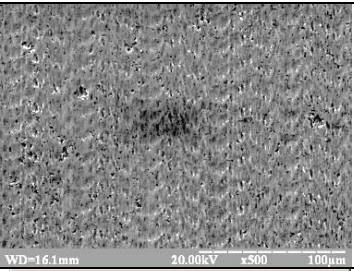
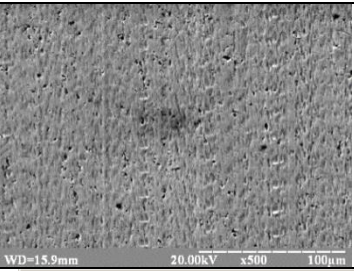
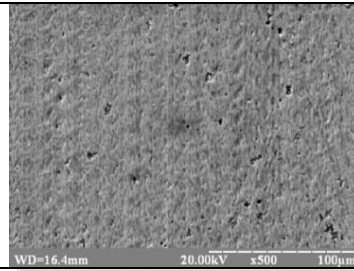
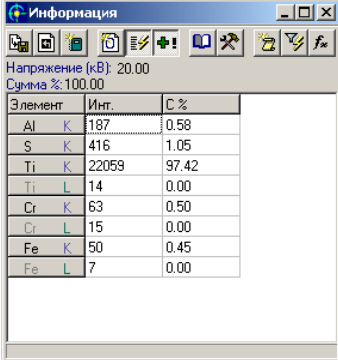
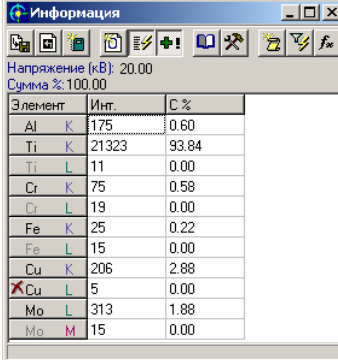
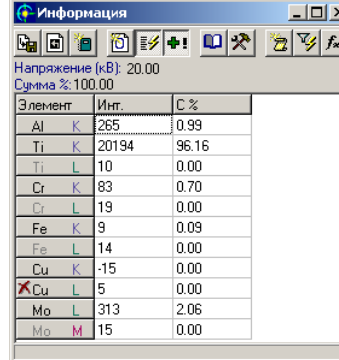
Встановлено, що застосування металовмісних мастил при УЗ вигладжуванні не призводить до збільшення шорсткості поверхні в порівнянні з використанням масла И20 і забезпечує  $0,13 \geq Ra \geq 0,22$  мкм.

Експериментально досліджено УЗ вигладжування з поздовжньо-крутильними коливаннями індентора. Встановлено, що при збіжності напрямку переміщення індентора і поверхні деталі відбувається зменшення шорсткості поверхні, в порівнянні з режимом, коли переміщення направлені в протилежні сторони. Так при початковій шорсткості поверхні 1,8 мкм, зі збільшенням швидкості обробки з 6,3 до 31,65 м/хв при збігу напрямків переміщень шорсткість поверхні деталі

збільшується з 0,9 до 1,0 мкм без видимого руйнування поверхні, при розбіжності напрямків переміщень шорсткість збільшується з 0,6 до 1,4 мкм з руйнуванням поверхні.

Таблиця 1

Фактура поверхні деталі і її хімічний склад залежно від мастила

V, м/хв	И20	И20+Cu	И20+Al																																																																																																			
21,8																																																																																																						
Хім. склад при 21,8 м/хв	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>187</td><td>0.58</td></tr> <tr><td>S K</td><td>416</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>22059</td><td>97.42</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>14</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>63</td><td>0.50</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>50</td><td>0.45</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>7</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	187	0.58	S K	416	1.05	Ti K	22059	97.42	Ti L	14	0.00	Cr K	63	0.50	Cr L	15	0.00	Fe K	50	0.45	Fe L	7	0.00	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>175</td><td>0.60</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>21323</td><td>93.84</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>11</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>75</td><td>0.58</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>19</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>25</td><td>0.22</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu K</td><td>206</td><td>2.88</td></tr> <tr><td>Cu L</td><td>5</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mo L</td><td>313</td><td>1.88</td></tr> <tr><td>Mo M</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	175	0.60	Ti K	21323	93.84	Ti L	11	0.00	Cr K	75	0.58	Cr L	19	0.00	Fe K	25	0.22	Fe L	15	0.00	Cu K	206	2.88	Cu L	5	0.00	Mo L	313	1.88	Mo M	15	0.00	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>265</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>20194</td><td>96.16</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>10</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>83</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>19</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>9</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>14</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu K</td><td>-15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu L</td><td>5</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mo L</td><td>313</td><td>2.06</td></tr> <tr><td>Mo M</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	265	0.99	Ti K	20194	96.16	Ti L	10	0.00	Cr K	83	0.70	Cr L	19	0.00	Fe K	9	0.09	Fe L	14	0.00	Cu K	-15	0.00	Cu L	5	0.00	Mo L	313	2.06	Mo M	15	0.00
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	187	0.58																																																																																																				
S K	416	1.05																																																																																																				
Ti K	22059	97.42																																																																																																				
Ti L	14	0.00																																																																																																				
Cr K	63	0.50																																																																																																				
Cr L	15	0.00																																																																																																				
Fe K	50	0.45																																																																																																				
Fe L	7	0.00																																																																																																				
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	175	0.60																																																																																																				
Ti K	21323	93.84																																																																																																				
Ti L	11	0.00																																																																																																				
Cr K	75	0.58																																																																																																				
Cr L	19	0.00																																																																																																				
Fe K	25	0.22																																																																																																				
Fe L	15	0.00																																																																																																				
Cu K	206	2.88																																																																																																				
Cu L	5	0.00																																																																																																				
Mo L	313	1.88																																																																																																				
Mo M	15	0.00																																																																																																				
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	265	0.99																																																																																																				
Ti K	20194	96.16																																																																																																				
Ti L	10	0.00																																																																																																				
Cr K	83	0.70																																																																																																				
Cr L	19	0.00																																																																																																				
Fe K	9	0.09																																																																																																				
Fe L	14	0.00																																																																																																				
Cu K	-15	0.00																																																																																																				
Cu L	5	0.00																																																																																																				
Mo L	313	2.06																																																																																																				
Mo M	15	0.00																																																																																																				

В цьому розділі наведено результати обробки деталей у псевдозрідженому стані.

При обробці суцільних поверхонь у вигляді дисків діаметром 145 мм і товщиною 8 мм із алюмінієвого сплаву Д1Т визначали вплив швидкості деталі на продуктивність. Зі збільшенням швидкості деталі продуктивність обробки підвищується у всьому діапазоні швидкостей від 7,5 до 40,0 м/с. Зі збільшенням розміру зерна продуктивність обробки деталі підвищується. При збільшенні розміру зерна від 200 до 800 мкм знімання металу із суцільних поверхонь збільшився в 1,8...2,5 рази.

Серед досліджених матеріалів (BT3-1, BT9, ЭИ698-ВД і сталі 45) найкращу і приблизно однакову оброблюваність мають титанові сплави BT3-1 і BT9. Проведені дослідження показують, що шорсткість оброблених поверхонь титанових дисків і дисків з жароміцних сплавів після обробки в псевдозріджувальному шарі абразиву Ra 63,0...51,2 мкм при вихідній Ra 51,2 мкм.

Аналіз епюр залишкових напружень показує, що обробка дисків зі сплаву BT9 абразивними зернами карбиду кремнію зеленого зернистістю №20 і електрокорунда білого зернистістю №16 практично не міняє характеру епюр стискаючих залишкових напружень, наведених у поверхневому шарі після чистового точіння. Рівень стискаючих напружень досягає 450...550 МПа при глибині їхнього поширення - 140 мкм.

У восьмому розділі приведені експериментальні дослідження підвищення параметрів якості робочих лопаток компресора та тонкостінних деталей з

урахуванням технологічної спадковості видів обробки і релаксації залишкових напружень.

Після виконання формоутворюючої обробки пера лопатки пластичним деформуванням (точне гаряче штампування, калібрування, загартування, вальцювання, друге вальцювання, термообробка, третє вальцювання і остаточна термообробка) у поверхневому шарі спостерігається стабілізація величини (до 50 МПа) залишкових напружень розтягу, що знижують параметри якості поверхневого шару.

На другому етапі виготовлення робочих лопаток компресора застосовують поверхнево-зміцнювальну обробку відповідно до технологічної схеми, що включає: віброполірування, ручне доведення профілю пера та ультразвукове зміцнення (УЗЗ).

Віброполірування на глибині 2 мкм формують у поверхневому шарі залишкові напруження стиску з максимальною величиною 315...360 МПа, які на глибині 30 мкм плавно переходять у напруження розтягу з величиною до 50 МПа.

Ручне доведення профіля пера лопаток еластичним абразивним інструментом дозволяє одержати в поверхневому шарі на глибині 2 мкм залишкові напруження стиску величиною 375 МПа, які плавно переходять у залишкові напруження розтягу величиною 40 МПа.

Після УЗЗ на поверхні пера лопаток наводяться залишкові напруження стиску величиною 440 МПа із глибиною поширення до 100 мкм.

В роботі встановлено закономірності впливу ультразвукового зміцнення та термоекспозиції на величину і глибину поширення максимальних залишкових напружень стиску у поверхневому шарі зразків з титанового сплаву ВТ8.

Встановлено, що при термоекспозиції із часом витримки 2 години при  $t=240^{\circ}\text{C}$  після УЗЗ –5 хвилин максимум напружень стиску не змінився, але змінилася глибина їх залягання. Із часом витримки 6 годин залишкові напруження релаксували з -349 МПа до -264 МПа, тобто на 24,3%.

У зразках після УЗЗ–15 хвилин після термоекспозиції при  $t = 480^{\circ}\text{C}$  з часом витримки 2 години максимум - 264 МПа тобто на 29,6% менше, ніж у вихідному. При термоекспозиції із часом витримки 6 годин максимум напружень стиску релаксував на 28%.

При холодному вальцюванні лопаток з жароміцного сплаву ХН77ТЮРВД найбільш раціональний рівень властивостей досягається остаточною термообробкою в захисному середовищі на режимі загартування при температурі  $1000^{\circ}\text{C}$  протягом 4 годин і старіння при температурі  $750^{\circ}\text{C}$  протягом 16 годин.

Встановлені термомеханічні умови гарячої деформації заготовок, холодного вальцювання пера і режимів попередньої й остаточної термообробки дозволяють забезпечити необхідний рівень тривалої міцності при випробуванні при температурі  $550^{\circ}\text{C}$  и напрузі 800 МПа, а також високий рівень їхньої границі витривалості.

У дев'ятому розділі представлені результати оцінки довговічності та границі витривалості деталей оброблених процесами представленими в даній роботі.

На підставі проведених втомних випробувань стандартних зразків зі сплавів ВТ22 і ВТ23 після УЗ вигладжування був використаний показник комплексної оцінки ефективності режимів і методів зміцнення - коефіцієнт зміцнення

$\beta_3 = \sigma_{-13M} / \sigma_{-1}$ , де  $\sigma_{-13M}$  - межа витривалості матеріалу після обробки УЗ вигладжуванням. Коефіцієнт зміцнення після УЗ вигладжування з використанням металовмісного мастила з мікропорошком алюмінію склав 1,39-1,45.

Експериментально встановлено залежність підвищення границі витривалості після виброміцнення від комплексного впливу параметрів якості поверхневого шару пера лопатки, а також віброполірування показало, що УЗЗ робочих лопаток з титанового сплаву значно підвищує комплекс значень та параметрів якості їхнього поверхневого шару, причому максимум коефіцієнта підвищення границі витривалості робочих лопаток після УЗЗ з титанового сплаву досягає 1,41, а з жароміцного сплаву - 1,26.

Експериментально встановлено, що при холодному вальцюванні лопаток з жароміцного сплаву ХН77ТЮР ВД найбільш раціональний рівень властивостей досягається остаточною термообробкою в захисному середовищі на режимі загартування при температурі 1000 °С протягом 4 годин і старінні при 750 °С протягом 16 годин, що забезпечує необхідний рівень тривалої міцності при випробуванні 550 °С і напруження 800 МПа. та високий рівень границі витривалості.

При обробці деталей ГТД у псевдорозрідженому шарі абразиву було встановлено:

- 1) при збільшенні радіуса викружки паза в диску з  $R = 1,2$  мм до  $R = 2$  мм довговічність дисків зросла в 2 рази;
- 2) обробка дисків у ПША підвищує їхню довговічність в 2,5...3 рази;
- 3) обробка диска зі збільшеним радіусом  $R = 2$  мм у викружці паза методом ПША підвищує довговічність в 5...6 разів у порівнянні із серійним диском.
- 4) живучість дисків склала від 41 до 77,8% від повної довговічності.
- 5) довговічність до руйнування міжпазових виступів дисків IV і V ступеня КВТ склала 950...3700 циклів.

Обробка барабана ротора КВТ у ПША в складі барабана із застосуванням повітряних сопів приводить до збільшення довговічності диска IV ступеня в 2,2 рази при температурі випробування, рівної 400°С, у порівнянні з обробкою в ПША без сопів.

Результати роботи впроваджені на промислових підприємствах ЗМКБ "Прогрес" і АТ "Мотор Січ".

Загальна кількість публікацій за науковою працею – 97, у тому числі 40 наукових статей, 6 патентів України, 2 монографій, 49 тез доповідей.

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Антон ЛАВРІНЕНКОВ/

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Сергій УЛАНОВ/

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Андрій ЗІЛІНСЬКИЙ/