

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ І ТЕОРЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

Рассматривается теоретико-экспериментальная методика определения параметров механической обработки поверхности металлического образца алмазным выглаживанием. Она позволяет по известным механическим характеристикам, геометрическим размерам образца получить расчеты рассеяния механической энергии и решить обратную задачу определения необходимых эксплуатационных характеристик материала на основе теоретической модели. Для экспериментального подтверждения теоретических расчетов использовали свободные поперечные затухающие колебания консольно зажатого образца.

The article focuses the theoretical and experimental method of determining the parameters of the machining surface of a metal sample diamond smoothing. Due to the given mechanical properties and geometric dimensions of the sample it allows to get estimations of scattering of mechanical energy and to solve the inverse problem of determining the necessary operating characteristics of the material on the basis of the theoretical model. Free transverse damped cantilever of the clamped sample was used to verification the theoretical calculations.

Вступ.

Особливістю основних валів сучасних газотурбінних двигунів ГТД є те, що їх виготовляють порожнистими і тонкостінними, товщина оболонки становить 1,6-4,0 мм [1]. У процесі експлуатації вали зазнають циклічних навантажень при високих частотах обертання і підвищених температурах. Довговічність і робочі властивості валів визначаються, в основному, станом їх поверхневого шару, який формується на фінішних етапах технологічного процесу виготовлення.

Поверхневий шар характеризується точністю і шорсткістю поверхонь вала, величиною, знаком і характером розподілу залишкових напружень, глибиною і ступенем наклепу, структурою і текстурою поверхні. Усі ці характеристики визначають границю витривалості валу. Автори робіт [2, 3] показали, що тільки комплексний підхід до вибору технологічних факторів виготовлення комплектуючих деталей може забезпечити максимальну реалізацію експлуатаційних характеристик виробу. Аналіз технологій виготовлення показує, що найбільш ефективною фінішною операцією виготовлення валів є поверхнєве пластичне деформування, яке підвищує утомні властивості матеріалу деталей [4].

Найбільш ефективним способом поверхневого пластичного деформування є алмазне вигладжування [1-5], в результаті якого зменшується шорсткість зовнішніх і внутрішніх поверхонь, формуються необхідні залишкові стискаючі напруження у приповерхневому шарі. Дослідження [1, 2, 6] показали, що алмазне вигладжування потрібно робити з обох сторін деталі – внутрішньої і зовнішньої. На глибині 0,2 - 0,3мм ці напруження переходять у напруження меншого рівня, які розтягують матеріал і зрівноважують напруження стиску [3].

Вимірювання мікротвердості [7, 8] виявило максимальне її значення в шарах, які близькі до поверхні зразка, яка зазнала впливу алмазного наконечника. Мікротвердість зменшується із зростанням віддалі від поверхні і на глибині 200-300 мкм на 5-8% відрізняється від мікротвердості в середині зразка.

Суттєва залежність механічних характеристик матеріалу після обробки пластичним деформуванням і складність оцінки ефективності цієї операції на готових виробах приводить до необхідності розробки теоретико-експериментальної методики визначення необхідних параметрів на спеціальних зразках.

Метою роботи є експериментальна і теоретична оцінка ефективності обробки алмазним вигладжуванням сталей на основі розробленої методики.

Згідно з розробленою методикою, випробували зразки із сталі 07X12H2МБФ, вирізані із стінок вала ГТД, який пройшов повний цикл виготовлення. Розміри зразків становили 1x2x80 мм³. Термічна обробка за режимами гартування виконувалась в маслі з температури 1273-1323 К із наступним відпуском при температурі 913-943 К. Середні значення основних механічних характеристик сталі 07X12H2МБФ такі: границя текучості ($\sigma_{0,2}$) – 853МПа, пропорційності ($\sigma_{ну}$) – 823 МПа, міцності (σ_B) – 910 МПа; модуль пружності (E) – 2,08·10⁵ МПа; відносне видовження (ϵ) – 11%. Поверхня вала була оброблена алмазним вигладжуванням. Величина прикладеної сили алмазного наконечника до поверхні сталі становила для зразків №№1-6 відповідно через 50 Н від 50 до 300 Н.

Для характеристики розсіяння енергії механічних коливань використовують два параметри [9, 10]:

$$\psi = -\frac{T_a}{W} \frac{dW}{dt} - \text{відносне розсіяння енергії},$$

$$\delta = -\frac{T_a}{n} \frac{da}{dt} = -\frac{2\pi}{\omega a} \frac{da}{dt} - \text{декремент коливань системи},$$

де T_a - період коливань, ω - частота, W - амплітудне значення потенціальної енергії упродовж періоду коливань, a - амплітуда коливань.

У роботі [11] показано, що декремент коливань може успішно використовуватись для вивчення впливу різних технологічних операцій виготовлення валів ГТД на оцінку механічних характеристик витривалості, в тому числі і фінішної обробки - алмазне вигладжування. Вимірювання розсіяння механічної енергії проводили на оберненому крутильному маятнику. Амплітуда зсувної деформації при крученні змінювалась від $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$, частота коливань - 1,5 Гц.

У даній роботі досліджували вільні поперечні затухаючі коливання консольно затиснутого зразка тих же розмірів, що і при крутильних коливаннях. Форму цих коливань записували за допомогою програми Sound Forge на спеціальній установці [12, 13] і за допомогою запропонованої спеціальної програми отримали загальну обвідну, обвідну смуги частот та обвідну найбільшої гармоніки у смузі частот. Особливістю програми є можливість в залежності від часу визначати частоту і амплітуду коливань, обчислювати логарифмічний декремент коливань системи.

На рис. 1 показано результати експериментальних досліджень: осцилограму затухаючих коливань і зміну амплітуди та логарифмічного декременту з часом.

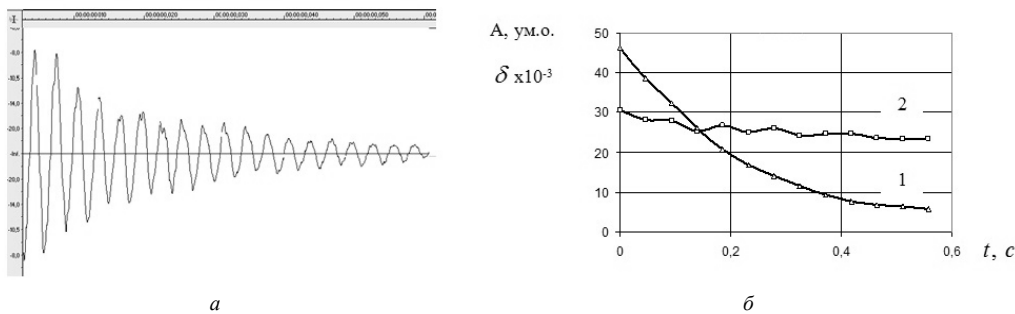


Рис. 1. Осцилограма (а) і часова залежність (б) амплітуди (1) і декременту (2) коливань зразка із сталі 07X12H2МБФ обробленого алмазним вигладжуванням

У роботі [14] досліджено вплив режимів алмазного вигладжування на характер затухаючих коливань і часові залежності амплітуди, частоти і декременту коливань сталевих зразків. Результати дослідження дають змогу оцінювати межі витривалості матеріалу.

Оцінити складний вплив технологічних факторів на експлуатаційні властивості деталей ГТД з метою встановлення оптимальних режимів їх виготовлення не можливо без розгляду математичної моделі поведінки матеріалу деталей. Якщо за відомими механічними характеристиками, геометричним розмірами зразків отримати розрахунки параметрів розсіяння в них механічної енергії, то обернена задача дозволить за відомими параметрами коливної системи, на основі теоретичної моделі, розраховувати необхідні експлуатаційні характеристики матеріалу.

У результаті поверхневої пластичної обробки вала утворюються три шари з різними, але близькими механічними характеристиками. Два зовнішніх, з поліпшеними характеристиками міцності. У яких, як показали металографічні дослідження [7], існує зона товщиною до 100 мкм дроблення вихідного зерна і перехідна зміцнена зона, у якій значних структурних змін не спостерігається і зміцнення, швидше за все, відбувається на дислокаційному рівні. Глибина зміцненого шару становить 400 – 550 мкм [1,4]. Середній шар має властивості матеріалу зразка у початковому стані. Схему поперечного перерізу стрижня (симетричний відносно нейтральної лінії) показано на рис. 2.

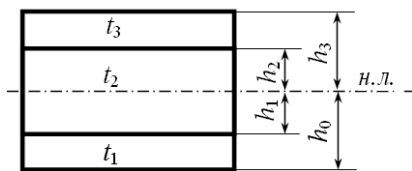


Рис. 2. Схема тришарового стрижня обробленого алмазним вигладжуванням

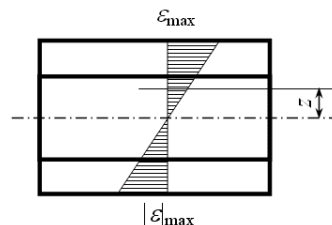


Рис. 3. Схема розподілення деформацій по товщині тришарового стрижня з близькими модулями пружності шарів

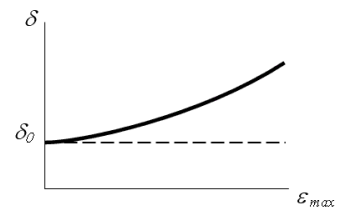


Рис. 4. Крива зміни декременту коливань

Для побудови математичної моделі використано результати роботи В.В. Хільчеського, В.Г. Дубенця [10], у якій розглядаються моделі багатошарових елементів з амплітудно-залежним розсіянням енергії.

Для матеріалів шарів з близькими модулями пружності використано модель тришарового стержня, яка базується на гіпотезі плоских перерізів (рис. 3) і відповідних енергетичних формулюваннях.

Потенціальна енергія деформації стержня з урахуванням гіпотези розподілення деформацій по товщині (рис. 3)

$$\varepsilon = -z \frac{d^2 w}{dx^2},$$

$$W_0 = \frac{1}{2} \int_{(H)} \int_{(L)} E z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx dz = \frac{a^2}{2} \int_{(H)} \int_{(L)} E z^2 \left| \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right|^2 dx dz$$

$$w_{(x)} = a \bar{w}(x), \quad \bar{w}(x) - \text{форма коливань, } a - \text{амплітуда.}$$

Енергія дисипації

$$W_{\text{duc}} = \frac{1}{2} \int_{(H)} \int_{(L)} E z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 2\delta dx dz,$$

(δ – декремент коливань матеріалу шарів).

Залежність декременту коливань для матеріалів апроксимуємо двочленними залежностями (рис. 4):

$$\delta_i = \delta_{i0} + \delta_i \varepsilon_{\text{max}}^K, \quad (i = 1..3),$$

де коефіцієнти δ_{i0} , δ_i , K визначаються експериментально шляхом випробування відповідних зразків з однорідних матеріалів.

З урахуванням двочленної формули для δ , одержимо

$$\begin{aligned} W_{\text{duc}} &= \frac{1}{2} \int_{(H)} \int_{(L)} E z^2 \delta_{0i} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx dz + \int_{(H)} \int_{(L)} E |z|^{2+\kappa} \delta_{1i} \left| \frac{d^2 w}{dx^2} \right|^{2+\kappa} dx dz = \\ &= a^2 \delta_{0i} \int_{(H)} \int_{(L)} E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx dz + a^{2+\kappa} \delta_{1i} \int_{(H)} \int_{(L)} E |z|^{2+\kappa} \left| \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right|^{2+\kappa} dx dz, \end{aligned}$$

($|a|$ – абсолютне значення (модуль) величини, t_i - товщина шарів).

Декремент коливань тришарового стержня довжиною L :

$$\delta_c = \frac{W_{\text{duc}}}{2W_0} = \frac{\sum_{i=1}^3 \int_{(L)} \int_{t_i} E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 \delta_{0i} dx dz + a^\kappa \sum_{i=1}^3 \int_{(L)} \int_{t_i} E |z|^{2+\kappa} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^{2+\kappa} \delta_{1i} dx dz}{2 \sum_{\kappa=1}^3 \int_{(L)} \int_{t_i} E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx dz + 2 \sum_{\kappa=1}^3 \int_{(L)} \int_{t_i} E |z|^{2+\kappa} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^{2+\kappa} dx dz}$$

де перший доданок – амплітудно-незалежна частина, а другий – амплітудно-залежна частина енергії дисипації.

У одержану формулу входять інтеграли, які обчислюються після конкретизації залежностей для декрементів матеріалів і форми коливань $\bar{w}(x)$:

$$\int_{(L)} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx, \quad \int_{(L)} \left| \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right|^{2+\kappa} dx,$$

$$\int_{(H)} E z^2 dz = \int_{-h_0}^{h_1} E_1 z^2 dz + \int_{h_1}^{h_2} E_2 z^2 dz + \int_{h_2}^{h_3} E_3 z^2 dz,$$

$$\int_{(H)} E |z|^{2+\kappa} dz = \int_{-h_0}^{h_1} E_1 |z|^{2+\kappa} dz + \int_{h_1}^{h_2} E_2 |z|^{2+\kappa} dz + \int_{h_2}^{h_3} E_3 |z|^{2+\kappa} dz,$$

($E_1 = E_3$ для симетричного перерізу).

Для несиметричного перерізу положення нейтральної лінії буде визначатися за формулою

$$h_0 = - \frac{E_1 t_1^2 + E_2 t_2^2 + E_3 t_3^2 + 2E_2 t_1 t_2 + 2E_3 t_1 t_3 + 2E_3 t_2 t_3}{2E_1 t_1 + 2E_2 t_2 + 2E_3 t_3}$$

На рис. 5 представлені результати теоретичних розрахунків осцилограми і величини амплітуди коливань в залежності від часу. Отримані результати наближаються до результатів експериментальних вимірювань, представлених на рис. 1.

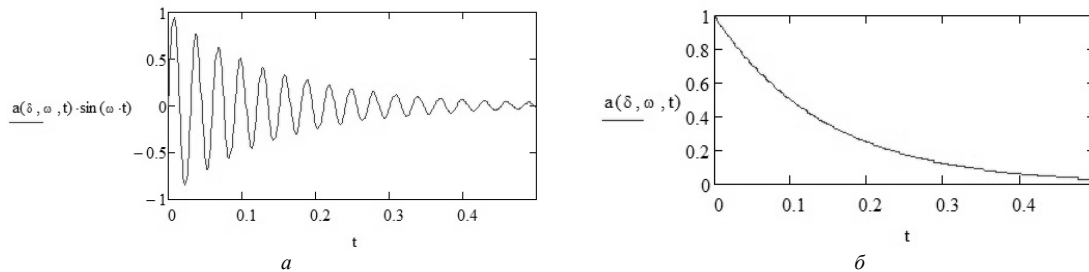


Рис. 5. Осцилограма затухаючих коливань (а) і залежність амплітуди коливань від часу консольно затиснутого трьохшарового стержня

Порівняння результатів експерименту і теоретично визначених параметрів вказує на можливість планування режимів обробки для одержання необхідних механічних характеристик матеріалу.

Висновки.

- 1) Розроблена математична модель розрахунку декременту коливань стержня з матеріалу після обробки алмазним вигладуванням на основі уявлення його у вигляді тришарового тіла зі змінними властивостями.
- 2) З використанням математичної моделі отримані розрахункові дані величини амплітуди коливань в залежності від часу, які наближаються до експериментальних результатів.
- 3) Розроблена методика розрахунку на базі математичної моделі дає можливість прогнозування режимів обробки вигладуванням для одержання необхідних механічних характеристик матеріалу.

Список літератури

1. Богуслаев В.А., Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Титов В.А., Попенко А.И. Формирование параметров качества несущих поверхностей валов ГТД алмазным выглаживанием // Вестник двигателестроения, 2003. - № 1. - С. 84 – 89.
2. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.
3. Мозговой В.Ф. Титов В.А., Качан А.Я., Особенности комплексной оценки деформационных параметров поверхностного слоя при изготовлении тонкостенных валов ГТД // Технологические системы. – 2000, №2(4). – С.56-66.
4. Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Грабовский А.П., Петренко Э.Г. Оценка эффективности финишной технологической обработки алмазным выглаживанием валов ГТД из стали Х12НБМФ-Ш при испытаниях на многоцикловую усталость // Технологические системы, 2001. - №1(7). – С. 37 – 41.
5. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
6. Яценко В.К., Притченко В.Ф. Повышение усталостной прочности валов ГТД // Авиационная промышленность. – 1980. - №4. - С. 23-25.
7. Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Титов В.А., Калюжний В.Л., Семеренко И.Л. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания пр. изготовлнии валов ГТД // Технологические системы. – 2001, №5(11). – С. 78 – 85.
8. Мозговой О.В., Чепугов О.П., Титов А.В. Вплив поверхневої деформації на міцнісні властивості сталі 07Х12Н2МБФ // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов.– Вып.11.– Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2008.– С. 288-291.
9. Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем. – Киев: Наук. Думка, 1976. – 86 с.
10. Хильчевский В.В., Дубенец В.Г. Рассеяние энергии при колебаниях тонкостенных элементов конструкций. – Киев: Вища школа, 1977. – 250 с.
11. Мозговой О.В., Мозговой В.Ф., Качан О.Я., Титов В.А. Вплив обробки поверхні пластичним деформуванням на параметри внутрішнього тертя в сталях // Вісник двигунобудування, 2003. -№1. – С. 96 – 99.
12. Богуслаев О.В., Мозговой О.В., Мозговой С.В., Качан А.Я., Титов А.В. Диагностика лопаток ГТД звуковым методом // Вісник двигунобудування, 2004. - № 1. – С.148 – 150.
13. Мозговой О.В. Визначення дійсного значення декременту коливань звуковим методом // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. - №60. – С. 228 – 231.
14. Титов В.А., Мозговой О.В. Вплив алмазного вигладування поверхні сталей на розсіяння механічної енергії // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. - №54. - С. 131 – 140.