

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

Мозговой А.В. – к. т. н., доцент

(Винницкий государственный педагогический университет им. Михаила Коцюбинского, Украина)

Изучалось влияние усилия прижима алмазного наконечника к поверхности вала газотурбинного двигателя на параметры свободных затухающих поперечных колебаний консольных образцов. Построенная математическая модель позволяет исследовать колебания слоистых стержней в зависимости от модулей упругости, декрементов колебания каждого слоя, форм колебаний и конструктивных размеров.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и обеспечение высокого ресурса газотурбинных двигателей (ГТД) возможно при разработке эффективных технологий. Только комплексный подход к учету технологических факторов изготовления комплектующих деталей может обеспечить оптимальные эксплуатационные свойства изделия [1-3]. Наиболее нагруженными и труднообрабатываемыми деталями ГТД являются тонкостенные валы [3]. Существенное влияние на эксплуатационные свойства валов оказывает финишная поверхностная пластическая обработка, к которой относится и алмазное выглаживание. Метод алмазного выглаживания является одним из наиболее перспективных видов термомеханической обработки металлов и сплавов, позволяющим существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий. В процессе алмазного выглаживания происходит упрочнение материала и повышается его износостойкость. Обработка данным методом изменяет свойства как приповерхностного слоя материала, так и всего изделия. При этом происходит существенное изменение структуры материала.

При натурных испытаниях деталей и конструкций ГТД существуют определенные технические сложности и большие материальные затраты.

Исследования в лабораторных условиях влияние режимов алмазного выглаживания на формирование комплекса параметров качества тонкостенных валов ГТД, а также изучение поведения материала при эксплуатационных режимах экономически выгодно и уменьшает время на получение результатов исследований.

Используя свободные затухающие колебания, в работах [4-6] показано, что метод внутреннего трения может успешно применяться для изучения влияния различных технологических операций изготовления валов ГТД. Анализ полученных результатов амплитудной зависимости внутреннего трения, в зависимости от режимов поверхностной пластической обработки алмазным выглаживанием, показал, что наиболее оптимальной является обработка поверхности усилием в 200 Н. Анализ температурной зависимости внутреннего трения образцов, обработанных при разных режимах алмазным наконечником, позволили определить оптимальные режимы технологической обработки деталей для получения необходимых эксплуатационных характеристик.

Степень упрочнения, величина остаточных напряжений и глубина их залегания определяются, как правило, экспериментально, что является трудоемким процессом. Использование аналитических методов математического описания исследуемых процессов перспективно.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследований являлись образцы стали 07X12H2МБФ, которые прошли упрочняющую термическую обработку и финишную механическую обработку алмазным выглаживанием с различной величиной силы прижима рабочей части алмазного наконечника. Усилие прижима изменялось в пределах от 50 Н до 300 Н через каждые 50 Н. Предварительная термическая обработка проводилась закалкой от 1273-1323 К в масло, с последующим отпуском при температуре 913-943 К. Из готового изделия цилиндрической формы получены образцы с помощью электроискровой резки, длинная часть которых совпадает с осью цилиндра.

Измерения внутреннего трения (Q^{-1}) и динамического модуля упругости ($G \approx G^2$) образцов данной стали в работах [4-6] проводили на низкочастотной установке типа обратного крутильного маятника. Частота колебаний составляла 1,5 Гц, температура – от 293 К до 873 К, амплитуда сдвиговой деформации – $5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-3}$. Ошибка при определении Q^{-1} зависела от амплитудных и температурных интервалов измерения и в среднем составляла не более 3 %.

В данной работе исследовали свободные поперечные затухающие колебания консольного образца. Колебания записывали с помощью программы Sound Forge на установке [7,8] и с помощью предложенной специальной программы Damping получили общую обводную, обводную полосы частот и обводную наибольшей гармоники в полосе частот. Также программа, в зависимости от времени, определяет частоту, амплитуду и логарифмический декремент колебаний системы.

Предлагаемая программа совершает частотно-полосовой анализ сигнала обводной свободных затухающих колебаний, хранящейся в 16-битных, РСМ (Pulse Code Modulation), моно, 44100 Гц частотой дискретизации звуковых файлов формата RIFF(wav). Программа

обеспечивает вычисление параметров и пользовательский интерфейс для ввода необходимых параметров и отображения результатов для дальнейшего анализа.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке поверхности вала ГТД алмазным выглаживанием в поверхностном слое образуется зона дробления исходного зерна, величина которой достигает 60-100 мкм. Результаты замера микротвердости показывают, что в области больших пластических деформаций существует переходная упрочненная зона [9,10]. Расчет глубины упрочненного слоя выполнен в работе [9] и составляет 0,55 мм. Поэтому подготовленные образцы для исследований представляют собой трехслойный стержень, схема которого представлена на рис. 1.

Слои толщиной t_1 и t_3 - упрочненные, а слой толщиной t_2 имеет свойства исходного материала.

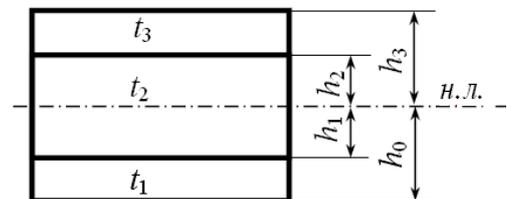


Рис. 1. Схема трехслойного стержня.

При помощи программы Sound Forge после возбуждения колебаний их кривая записывается в компьютер в отдельный файл. На рис. 2 представлены кривые затухания колебаний шести исследуемых образцов. Номер образца соответствует величине усилия, с которым прижимался алмазный наконечник к поверхности: первый образец соответствует усилию 50 Н и далее через 50 Н до шестого образца, для которого усилие составляло 300 Н.

Различные усилия при технологической операции с использованием алмазного наконечника внесли изменения в структуру материала, что и вызвало различие вида кривых затухания свободных поперечных колебаний консольных образцов.

На рис.3 представлены результаты обработки кривых затухания программой Damping.

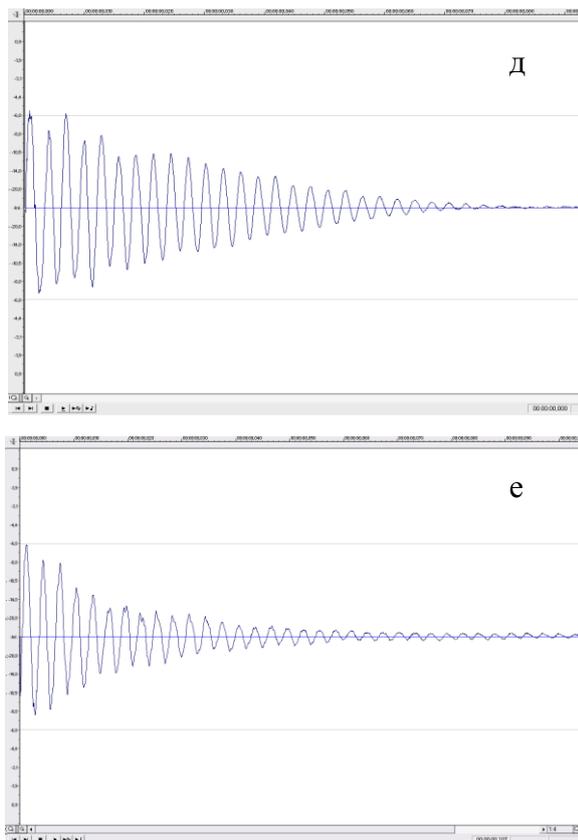
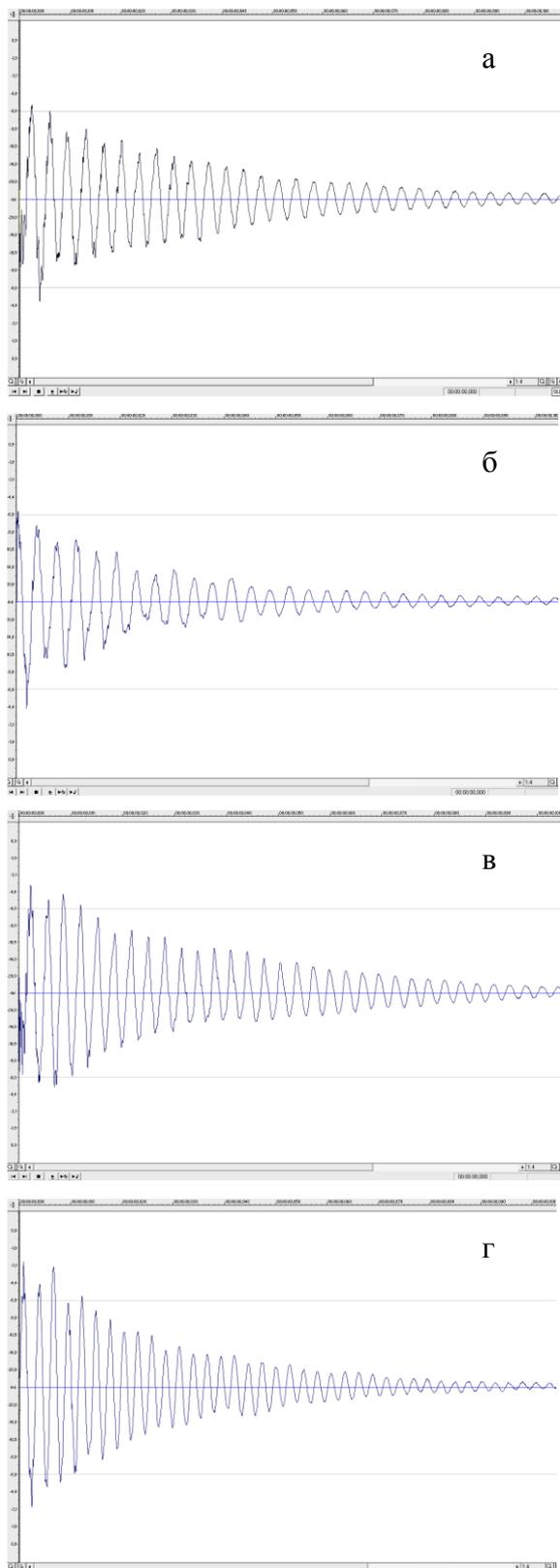


Рис. 2. Осциллограммы стальных консольных образцов: а – усилие прижима алмазного наконечника к поверхности образца составляет 50 Н; б – 100 Н; в – 150 Н; г – 200 Н; д – 250 Н; е – 300 Н.

Математическая модель для определения собственных форм, частот и декремента колебаний трехслойного стержня построена с использованием модели многослойных элементов с амплитудно-зависимым рассеянием энергии, рассмотренной в работе [11].

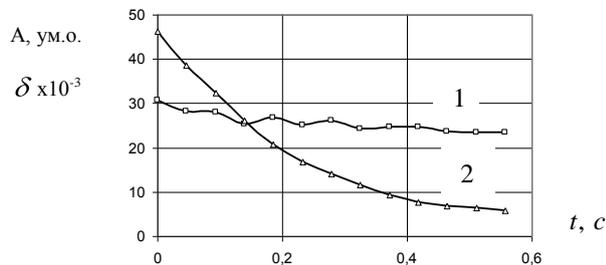


Рис. 3. Временные зависимости декремента (1) и амплитуды (2) свободных колебаний стальных консольных образцов.

Демпфирующие свойства материала вводятся при помощи комплексных модулей. Мнимые части комплексных

модулей для каждого материала определяются известными декрементами колебаний.

При построении модели использовался метод конечных элементов для стержня с близкими модулями упругости слоев, когда справедлива гипотеза плоских сечений.

В процессе деформации стержня, с учетом гипотезы распределения деформаций по толщине, потенциальная энергия будет определяться такой формулой:

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

где $w(x) = a \bar{w}(x)$, $\bar{w}(x)$ – форма колебаний, a – амплитуда.

Энергию диссипации можно определить с помощью формулы:

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

Зависимости декремента колебаний материалов аппроксимируем двучленными зависимостями:

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

где коэффициенты δ_{i0} , δ_i , k определяются путем испытаний образцов с однородных материалов.

С учетом двучленной формулы δ , получим

$$\begin{aligned} W_{\text{ouc}} &= \frac{1}{2} \int_{(H)L} \int E z^2 \delta_{oi} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx dz + \\ &+ \int_{(H)L} \int E |z|^{2+k} \delta_{li} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^{2+k} dx dz = \\ &= a^2 \delta_{oi} \int_{(H)L} \int E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx dz + \\ &+ a^{2+k} \delta_{li} \int_{(H)L} \int E |z|^{2+k} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^{2+k} dx dz, \end{aligned}$$

где t_i - толщина слоя. Для трехслойного стержня L декремент колебаний будет определяться формулой:

$$\begin{aligned} \delta_c &= \frac{W_{\text{ouc}}}{2W_0} = \frac{\sum_{i=1}^3 \int_{(L)(t_i)} \int E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 \delta_{oi} dx dz}{2 \sum_{k=1}^3 \int_{(L)(t_i)} \int E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx dz} + \\ &+ \frac{a^k \sum_{i=1}^3 \int_{(L)(t_i)} \int E |z|^{2+k} \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^{2+k} \delta_{li} dx dz}{2 \sum_{k=1}^3 \int_{(L)(t_i)} \int E z^2 \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \right)^2 dx dz}, \end{aligned}$$

где первое слагаемое – амплитудно-независимая часть, а второе – амплитудно-зависимая часть энергии диссипации.

На рис. 4 представлены результаты теоретических расчетов осциллограммы и амплитуды колебаний в зависимости от времени, которые практически совпадают с экспериментальными данными рис. 2 и рис. 3.

Результаты эксперимента и математических расчетов дают возможность

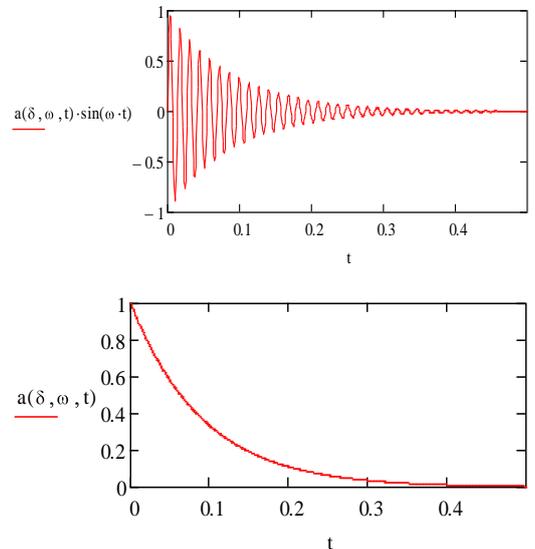


Рис. 4. Осциллограмма (а) и временная зависимость амплитуды (б) затухающих колебаний трехслойного стержня, рассчитанных теоретически.

определить параметры колебательного процесса в зависимости от модулей, геометрических размеров и свойств рассеяния энергии материалом слоев, входящих в состав образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи специальной установки определены параметры свободных затухающих колебаний консольно зажатого трехслойного стержня. Установлено влияние на осциллограммы, частоту и время полного затухания режимов технологической обработки алмазным выглаживанием поверхности вала газотурбинного двигателя.

С помощью модели многослойных элементов построена математическая модель определения собственных форм, частот и декрементов колебаний трехслойного стержня с близкими модулями упругости слоев.

Сравнение экспериментальных результатов и данных математических расчетов подтверждает правильность построенной математической модели. Ее использование позволяет планировать режимы термомеханических обработок с целью получения оптимальных эксплуатационных характеристик, а также учитывать влияние на них повреждений поверхностного слоя изделий.

Полученные результаты позволяют решить обратную задачу - определить техническое состояние материала (изделия) и сделать выводы о его дальнейшей обработке или эксплуатации.

Таким образом, использование рассеяния механической энергии при свободных затухающих колебаниях с применением математических моделей, позволяет решать сложные технологические задачи изготовления и диагностики изделий в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. БОГУСЛАЕВ, В.А.; ЯЦЕНКО, В.К.; ПРИТЧЕНКО, В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД, Киев, Манускрипт, 1993, 333 с.

2. МОЗГОВОЙ, В.Ф.; КАЧАН, А.Я.; ТИТОВ, В.А.; КАЛЮЖНЫЙ, В.Л.; СЕМЕРЕНКО, И.Л. Оценка оптимизированных технологических

параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД, Технологические системы, 2001, №5(11), с.78-85.

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. МОЗГОВИЙ, О.В.; МОЗГОВИЙ, В.Ф.; КАЧАН, А.Я.; ТИТОВ, В.А. Вплив обробки поверхні пластичним деформуванням на параметри внутрішнього тертя в сталях, Вісник двигунобудування, 2003, №1, с. 96-99.

5. МОЗГОВИЙ, О.В.; ТИТОВ, А.В. Вплив поверхневого пластичного деформування на температурний спектр внутрішнього тертя сталі 07X12НМБФ Обработка материалов давлением, 2010, №3(24), с.122-125.

6. МОЗГОВИЙ, О.В.; ТИТОВ, В.А.; АТАМАНЮК, В.В. Прогнозування стану поверхневого шару деталей і їх експлуатаційних характеристик за допомогою механічної спектроскопії, Структурна релаксація у твердих тілах. Зб. наук. праць, Вінниця, 2006, с. 68 - 69.

7. БОГУСЛАЄВ, О.В.; МОЗГОВИЙ, О.В.; МОЗГОВИЙ, С.В.; КАЧАН, А.Я.; ТИТОВ, А.В. Діагностика лопаток ГТД звуковим методом, Вісник двигунобудування, 2004, № 1, с.148-150.

8. МОЗГОВИЙ, О.В. Визначення дійсного значення декременту коливань звуковим методом, Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Машинобудування, 2010, №60, с. 228-231.

9. МОЗГОВОЙ, В.Ф.; КАЧАН, А.Я.; ТИТОВ, В.А.; КАЛЮЖНЫЙ, В.Л.; СЕМЕРЕНКО, И.Л. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД, Технологические системы, 2001, №5(11), с. 78-85.

10. МОЗГОВИЙ, О.В.; ЧЕПУГОВ, О.П.; ТИТОВ, А.В. Вплив поверхневої деформації на міцнісні властивості сталі

07X12H2МБФ, Породоразрушающий и металлообработывающий 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.

11. ХИЛЬЧЕВСКИЙ, В.В.; ДУБЕНЕЦ, В.Г. Рассеяние энергии при колебаниях тонкостенных элементов конструкций, Киев, Вища школа, 1977, 250 с.

УДК 669.017:539.374:539.67:534.282

USING MECHANICAL ENERGY SCATTERING IN EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF STEEL SURFACE PROCESSING VIA DIAMOND

Mozgovoy A.V. – dr.

(Vinnitsa State Pedagogical University named after Mikhail Kotsyubynsky, Ukraine)

The article studies the effect of downforce diamond tip to the surface of the shaft turbine gas engine on the parameters of free damped transverse vibrations of consol specimens. The mathematical model allows us to explore vibrations of layered rods, depending on the elastic moduli, the decrement of each layer, the form of vibrations and structural dimensions.

Prezentat la redacție la 14.04.2011