

УДК 621.438:621.822

С.А. Букатый

ООО Научно-коммерческая фирма «СБК», г. Рыбинск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ И СВОЙСТВ НАНОПОКРЫТИЙ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

В статье рассмотрено влияние толщины и свойств материала нанопокрывтий на частотные характеристики деталей с целью отстройки от резонансных колебаний. На основе теории колебаний стержней получены общие выражения для оценки степени влияния покрытий на собственные частоты деталей. На примере пластин с прямоугольным поперечным сечением сделана оценка влияния относительной толщины покрытий и показано, что независимо от свойств наноматериалов нано- и микроразмеры покрытий не приводят к сколько-нибудь значимому изменению собственных частот. Результаты расчета в первом приближении могут быть использованы для любых деталей.

Колебания, собственные частоты, наноматериалы, нанопокрывтия

Введение

Вопросы повышения прочности и долговечности деталей ГТД, подверженных вибрационным нагрузкам и эрозионному износу, становятся особенно актуальными в связи с появлением новых наноматериалов с существенно отличающимися от основного материала свойствами. Решение этой проблемы может идти как по пути повышения эксплуатационных свойств детали за счет свойств покрытия, так и путем отстройки от резонансных частот, что часто является решающим фактором для таких деталей, как лопатки компрессора ГТД. В работе [1] рассматривается второе направление и с привлечением конечно-элементного анализа исследуется влияние толщины и свойств материала нанопокрывтия на собственную частоту колебаний пластин с прямоугольным сечением. Однако ряд неверных положений и ошибок, допущенных в работе, привели авторов к неверным результатам, выводам и рекомендациям. Поэтому целью данной работы является корректная постановка задачи и исследование влияния толщины и свойств наноматериалов на собственные частоты деталей.

1. Общие принципы решения задачи

Из теории изгиба балок известно выражение для относительных деформаций ε материала на расстоянии y от нейтральной оси поперечного сечения

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ кривизна оси балки (в нашем случае достаточно длинную пластинку можно рассматривать как балку с прямоугольным поперечным сечением).

Следовательно, при рассмотрении взаимодействия покрытия с основным материалом, на границе между пластиной и слоем покрытия из условия совместности деформаций следует равенство деформаций основного материала и покрытия $\varepsilon_o = \varepsilon_n$. Из-за разности модулей упругости материалов в детали и покрытии будут действовать различные напряжения и дополнительно необходимо рассмотреть влияние различия диссипативных свойств материалов на собственные частоты.

В соответствии с поставленной в [1] задачей будем рассматривать изгибные колебания консольно закрепленного стержня. Тогда в соответствии с [2] собственные частоты такого стержня или достаточно длинной пластинки с постоянным сечением определяются следующим выражением

$$p_k = \frac{\lambda_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}, \quad (2)$$

где E и ρ – соответственно модуль упругости и плотность материала стержня; l , I и F – длина стержня, момент инерции и площадь поперечного сечения; λ_k – корни уравнения частот:

$$\lambda_1=1,875; \lambda_2=4,694; \lambda_3=7,855; \lambda_4=10,996 \text{ и} \\ \lambda_k=0,5\pi(2k-1) \text{ при } k>4. \quad (3)$$

Из выражения (2) следует, что независимо от соотношения толщины и свойств материалов основного и покрытия, собственная частота стержня в зависимости от номера формы колебаний не может оставаться неизменной, как показано в [1], а должна изменяться пропорционально числам λ_k^2 .

2. Результаты исследования

Известно, что диссипация энергии или силы сопротивления слабо влияют на собственные частоты колебаний. Например, при декременте $\delta = \ln A_1/A_2 = \ln 2 = 0,693$, собственная частота равна $p_1 \approx 0,994 \cdot p_0$. Здесь A_1 и A_2 – две соседние амплитуды затухающих колебаний; p_0 – собственная частота при отсутствии сил сопротивления. Т.о., даже при интенсивном затухании колебаний с декрементом $\delta = 69,3\%$ изменение частоты от действия сил сопротивления составляет всего $\sim 0,6\%$. В работе [3] показано, что наибольшие величины декремента, наблюдаемые у образцов с покрытием из иттрия толщиной до 130 мкм, не превышают 1%. Изменение частоты при таких декрементах будет порядка $10^{-3} - 10^{-4}\%$ и, следовательно, влиянием демпфирующих способностей покрытий на собственные частоты можно пренебречь.

Из выражения (2) следует, что собственные частоты стержней зависят от величин EI и ρF . Чтобы выяснить, какие соотношения физико-механических свойств и толщин основного материала и покрытия приведут к существенному изменению собственных частот, обозначим в (2) выражение под корнем через C и выразим величины EI и ρF через $E_1 I_1$, $\rho_1 F_1$ и $E_2 I_2$, $\rho_2 F_2$, соответствующие основному материалу и слою покрытия:

$$C = \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} = \sqrt{\frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{\rho_1 F_1 + \rho_2 F_2}} = \sqrt{\frac{E_1 I_1 (1 + \alpha_E \alpha_I)}{\rho_1 F_1 (1 + \alpha_\rho \alpha_F)}} = C_0 \sqrt{\frac{1 + \alpha_E \alpha_I}{1 + \alpha_\rho \alpha_F}}, \quad (4)$$

где

$$C_0 = \sqrt{\frac{E_1 I_1}{\rho_1 F_1}}; \alpha_E = \frac{E_2}{E_1}; \alpha_I = \frac{I_2}{I_1}; \alpha_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \alpha_F = \frac{F_2}{F_1}.$$

Величины коэффициентов α_E и α_ρ известны по условию. Для оценки коэффициентов α_I и α_F воспользуемся схемой пластины с прямоугольным сечением и постоянной шириной b (рис.1), используемой в работе [1]. В этом случае α_F и положение нейтральной оси поперечного сечения определяются выражениями

$$\alpha_F = \frac{bh_2}{bh_1} = \frac{h_2}{h_1}, \quad h_{но} = \frac{E_1 h_1 y_1 + E_2 h_2 y_2}{E_1 h_1 + E_2 h_2}, \quad (5)$$

где $y_1 = h_2 + 0,5h_1$, $y_2 = 0,5h_2$ – координаты центров тяжести поперечных сечений пластины и покрытия.

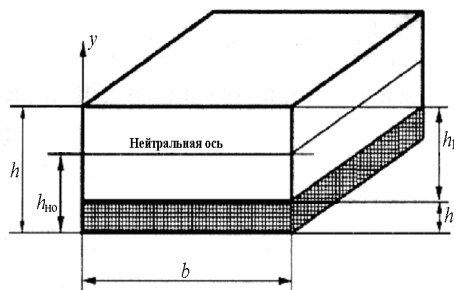


Рис. 1. Схема пластины с покрытием

Чтобы упростить выражение $h_{но}$ введем параметр $\beta = E_2 h_2 / E_1 h_1 = \alpha_E \alpha_F$. Тогда

$$h_{но} = \frac{y_1 + \beta y_2}{1 + \beta}. \quad (6)$$

Расстояния от нейтральной оси до центров тяжести сечений e_1 и e_2 будут определяться соотношениями

$$e_1 = h_2 + 0,5h_1 - h_{но}, \quad e_2 = h_{но} - 0,5h_2,$$

а выражения для моментов инерции поперечных сечений будут иметь вид

$$I_1 = \frac{bh_1^3}{12} + bh_1 e_1^2, \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{bh_2^3}{12} + bh_2 e_2^2.$$

Тогда выражение для α_I можно представить в следующем виде

$$\alpha_I = \frac{h_2^3 + 12h_2 e_2^2}{h_1^3 + 12h_1 e_1^2} = \frac{\alpha_F [\alpha_F^2 (1 + \beta)^2 + 3(1 + \alpha_F)^2]}{(1 + \beta)^2 + 3\beta^2 (1 + \alpha_F)^2}. \quad (7)$$

Следовательно, задавая свойства материалов E и ρ пластины и покрытия, в зависимости от соотношения толщин h_2 и h_1 можно сделать оценку изменения частоты пластины через относительный параметр η :

$$\eta = \left(\sqrt{\frac{1 + \alpha_E \alpha_I}{1 + \alpha_\rho \alpha_F}} - 1 \right) \times 100\%. \quad (8)$$

Результаты расчетов в системе Mathcad, приведенные в таблице, показывают, что для пластины из титанового сплава покрытие, обладающее свойствами стали, уже при $\alpha_F = h_2/h_1 \leq 0,01$ не оказывает существенного влияния на собственные частоты, которые зависят от жесткости пластины. Для изменения частот, например, для отстройки от резонанса, необходимы покрытия достаточной толщины, величину которой следует подбирать с учетом физико-механических свойств обоих материалов. С этой целью, например, используется покрытие в работе [4], где снижение вибраций дизель-генераторов и судов

вых конструкций достигалось путем демпфирования и изменения частот колебаний за счет присоединенной массы мастичных покрытий, толщина которых составляла "... от 0,5 до 2 толщин основания, на которое оно наносилось".

Влияние толщины покрытия на изменение собственной частоты колебаний пластины

$\alpha_F = h_2/h_1$	0,1	0,05	0,01	0,001	0,0001	0,00001
α_I	0,375	0,167	0,031	0,003	0,0003	0,00003
$\eta, \%$	18,63	8,94	1,74	0,174	0,0174	0,00174
Свойства материалов	$E_1 = 1,15 \cdot 10^5$ МПа $E_2 = 2,00 \cdot 10^5$ МПа $\alpha_E = 1,739$		$\rho_1 = 4,51 \cdot 10^3$ кг/м ³ $\rho_2 = 7,86 \cdot 10^3$ кг/м ³ $\alpha_c = 1,743$			

Заключение

Жесткость деталей зависит от величины модуля упругости материала и момента инерции поперечного сечения. Поскольку соотношение модулей упругости и плотностей основного материала и какого-либо наноматериала не может превышать одного порядка, то, учитывая соотношение моментов инерции поперечных сечений пластины и покрытия α_I (см. таблицу), действительные нано- и даже микро-покрытия не могут привести к какому-либо значащему изменению собственных частот. Данный вывод, несомненно,

справедлив для любых деталей типа стержень, т.к. результаты, полученные для пластин с прямоугольным сечением, в соответствии с выражениями (4) несложно распространить на детали с произвольным сложным сечением. Полученные выражения могут быть использованы как для оценки возможного изменения собственных частот, так и для разработки мероприятий для отстройки от резонансных частот деталей компрессора и турбины ГТД.

Перечень ссылок

1. Исследование влияния толщины и свойств нанопокрyтия пластины на ее частотные характеристики / А.Л. Михайлов, С.М. Скирта, А.В. Пахоменков, В.С. Чигрин // Сборка в машиностроении, приборостроении. –2007. –№11. –С. 24–26.
2. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том3// Под ред. д-ра техн. наук И.А.Биргера и чл.-корр. АН Латвийской ССР Я.Г. Пановко –М.:Машиностроение,1968. –567с.
3. Устинов А.И. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия / А.И.Устинов, Б.А. Мовчан, В.С.Скородзиевски // Проблемы прочности. –2001. –№4. –С.55–61.
4. Минасян М.А. Снижение вибрации дизель-генераторов и судовых конструкций за счет демпфирования мастичными покрытиями / М.А. Минасян, В.В. Медведев // Судостроение. – 2006. –№3. –С.36–38.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

S.A. Bukaty

THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THICKNESS AND PROPERTIES OF NANO-COATING UPON THE FREQUENCY CHARACTERISTIC OF GAS TURBINE PARTS PLATES

У статті розглянуто вплив товщини і якостей матеріала нанопокриттів на частотні характеристики деталей з ціллю виходу від резонансних коливань. На основі теорії коливань стержнів отримані спільні висловлювання для оцінки впливу покриттів на власні частоти деталей. На прикладі пластин з прямокутним поперечним сiчінням зроблена оцінка впливу відносної товщини покриттів і показано, що незалежно від якостей наноматеріалів нано- і мікророзміри покриттів не приводять до помітної зміни власних частот. Результати розрахунку в першому приближенні можуть бути використані для любых деталей.

Колівання, власні частоти, наноматеріали, нанопокриття

The influence of thickness and properties of nano-coating material upon the frequency characteristic of parts with the purpose of tune-out of the resonance vibrations is examined here. General expressions for the estimation of influence of coating upon the natural frequency of parts based on the bar vibration theory. On the example of the rectangular plates is shown that nano-size and micro-size of the coating is not to be sufficient avail concerning to changes of the natural frequency irrespective of the material properties of the coating. As the first approximation results of the solution can be used for any parts.

Vibration, self-resonant frequency, nano-material, nano-coating