

# ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ НА ВЕЛИЧИНУ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА НАЛИЧИЯ «ДЫШАЩЕЙ» ТРЕЩИНЫ

В. А. Круц, А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь

Институт проблем прочности имени Г.С. Писаренка НАН Украины,  
Киев, Украина

**Abstract.** The paper presents the results of computational experiments on determination of the influence of the coefficient of elastic coupling between the discrete model equitype elements (subsystems) of regular system on the value of vibrodiagnostic parameter due to the presence of a breathing crack. It is shown that due to elastic coupling between the elements the chosen parameter is evident not only within the damaged subsystem, but also within the undamaged one.

В процессе эксплуатации многих объектов техники, в частности рабочих лопаток турбомашин, вследствие воздействия широкого спектра силовых и температурных нагрузок возникают закрывающиеся или так называемые «дышащие» трещины. Они обуславливают существенное изменение их упругих характеристик в течение цикла деформирования, что является причиной нелинейности колебаний, проявляющейся в возникновении наряду с основным суб- и супергармонических резонансов исследуемой системы.

Задача изучения колебаний объектов техники с рассматриваемой трещиной и поиск надежных вибродиагностических критериев ее наличия в последнее время представляет все большую актуальность.

Для многих узлов машин характерны различного рода механические связи их составляющих элементов. Вследствие этого изолированное рассмотрение отдельного конструктивного элемента не позволяет достаточно точно описать его динамическое состояние. Поэтому в теории колебаний все большее внимание уделяется изучению сложных механических систем, среди которых особое место занимают регулярные системы, представляющие последовательное или параллельное соединение однотипных элементов (подсистем). К таким системам в первую очередь относятся пакеты лопаток, а также их венцы, как особый вид регулярных систем, обладающих поворотной симметрией.

С учетом вышесказанного, целью данной работы является расчетное определение влияния коэффициента упругой связи подсистем простейшей регулярной системы из двух однотипных элементов на величину вибродиагностического параметра наличия «дышащей» трещины.

Вынужденные колебания представленной на рис. 1 дискретной модели рассматриваемой системы при действии гармонической вынуждающей силы  $P(t) = P_0 \cos vt$  описываются нелинейной системой дифференциальных уравнений 2-го порядка:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 [1 - 0.5\alpha(1 + \text{sign} u_1)] u_1 + k_s (u_1 - u_2) = P_0 \cos vt; \\ M_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 + k_s (u_2 - u_1) = P_0 \cos vt. \end{cases}$$

Здесь  $M_j$ ,  $k_j$ ,  $c_j$  ( $j = 1, 2$ ) – приведенные масса, коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления  $j$ -й подсистемы соответственно при отсутствии ее повреждения;  $u_j$  – перемещение массы  $M_j$  относительно ее устойчивого равновесия;  $\alpha = (k - k_0)/k$  – параметр, интегрально характеризующий относительное изменение жесткости

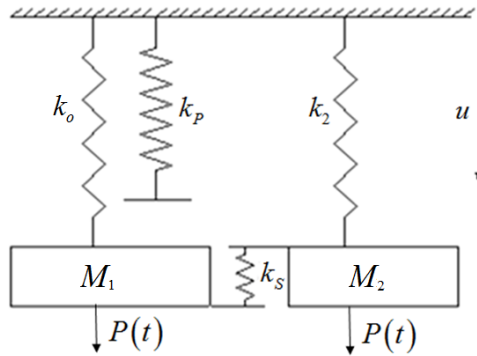


Рис.1. Дискретная модель простейшей регулярной системы с закрывающейся трещиной

подсистемы при наличии открытой трещины. С целью более отчетливого представления о влиянии закрывающейся трещины усталости на колебания простейшей регулярной системы в качестве ее исходного неповрежденного состояния принята строго регулярная система, для которой приведенные массы ( $M_1$  и  $M_2$ ), коэффициенты жесткости ( $k_1$  и  $k_2$ , где  $k_1 = k_o + k_p$ ) и вязкого трения ( $c_1$  и  $c_2$ ) подсистем одинаковы, т. е.  $M_1 = M_2 = M$ ;  $k_1 = k_2 = k$ ;  $c_1 = c_2 = c$ , где  $k_o$  – коэффициент жесткости подсистемы с открытой трещиной (в данном случае при  $u > 0$ ).

Вычислительные эксперименты в соответствии с постановкой задачи проводились при варьировании коэффициента упругой связи  $\gamma = k_s/k$ .

Рассмотрим результаты решения задачи на примере субгармонического резонанса порядка  $\frac{1}{2}$  при коэффициенте демпфирования  $h = c/M = 0.0008 \text{ c}^{-1}$ . Расчеты проводились по методике, представленной в [1]. В качестве вибродиагностического параметра было выбрано  $\alpha_1 = A^{(1)}/A^{(2)}$  – отношение амплитуд первой  $A^{(1)}$  и второй  $A^{(2)}$  гармоник колебаний.

Для рассматриваемой системы при наличии нарушения ее регулярности, как известно [2], даже при синфазном возбуждении характерны две формы колебаний – синфазная и антифазная. Поэтому для амплитуд возбуждаемых гармоник резонансных колебаний стержней образца с трещиной усталости введем обозначение  $A_j^{(iq)}$ , где  $i = 1, 2$  – номер гармоники колебаний;  $q = \text{I, II}$  – вид формы колебаний образца (I – синфазная; II – антифазная), а для вибродиагностического параметра –  $\alpha_{1j}^{(q)} = A_j^{(1q)}/A_j^{(2q)}$

По результатам вычислительных экспериментов были получены зависимости вибродиагностического параметра от параметра повреждения для поврежденной и неповрежденной подсистем дискретной модели регулярной системы, а также для поврежденной подсистемы в изолированном состоянии ( $\gamma = 0$ ), которые представлены на рис. 2. Видно, что с возрастанием коэффициента упругой связи  $\gamma$  величина вибродиагностического параметра для поврежденной подсистемы уменьшается, а для неповрежденной – возрастает. Это отчетливо иллюстрируется зависимостями вибродиагностического параметра от коэффициента упругой связи  $\gamma$  для величины параметра повреждения  $\alpha = 0.1$ , которые показаны на рис. 3. Анализ полученных данных показывает, что для малых значений коэффициента упругой связи величина вибродиагностического параметра  $\alpha_{1j}^{(q)}$  для неповрежденной подсистемы значительно меньше, чем для поврежденной, что усложняет возможность его применения для диагностики исследуемого повреждения. Однако, при возрастании коэффициента упругой связи  $\gamma$  значения вибродиагностического параметра для поврежденной и неповрежденной подсистем сближаются.

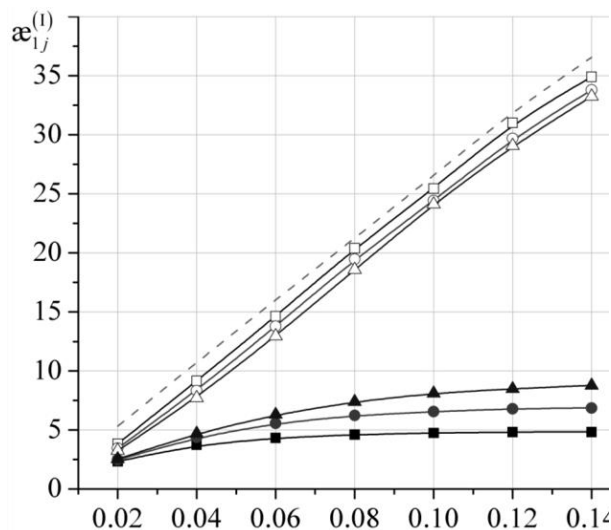


Рис. 2. Зависимости вибродиагностического параметра от параметра повреждения для поврежденной (светлые точки) и неповрежденной (темные) подсистем при субгармоническом резонансе для коэффициента упругой связи  $\gamma$ , равном 0.01 (■, □), 0.015 (●, ○), 0.02 (▲, △). Штриховая линия – поврежденная подсистема в изолированном состоянии

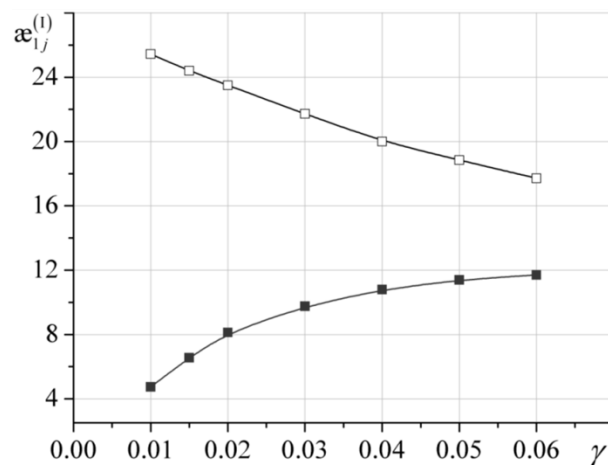


Рис. 3. Зависимость вибродиагностического параметра  $\alpha_{1j}^{(1)}$  от коэффициента упругой связи  $\gamma$  для поврежденной (□) и неповрежденной (■) подсистем при субгармоническом резонансе для  $\alpha = 0.1$

Следует также отметить, что при рассматриваемом режиме колебаний имеет место возбуждение антифазной формы подсистем дискретной модели регулярной системы. Однако ввиду малости амплитуд, соответствующих указанной форме колебаний, они не являются значимыми.

#### Литература

1. Kruts V. A. Influence of a Fatigue Crack on the Vibrations of the Simplest Regular Elastic System / V. A. Kruts, A. P. Zinkovskii, E. A. Synenko // Strength of Materials. – 2013. - **45**, No. 3. – P. 308-315.
2. Tokar' I. G. A study of the influence of damage in equitype elements on vibration of regular systems / I. G. Tokar', A. P. Zinkovskii // Strength of Materials. – 2006. – **38**, No. 2. – P. 135-140.

## DIAGNOSTICS OF DEGRADATION OF SURFACES TREATED BY THERMAL SPRAYING

M. Landová, M. Greš, J. Brezinová, A. Guzanová

Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Košice, Slovakia

**Abstract:** The paper deals with possibilities of utilization HVOF coatings in thermal cyclic loading and wear conditions. There were evaluated three types of coatings based on WC-Co, WC-Co-Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr. The quality of coatings was evaluated in terms of their adhesion during the cyclic thermal loading (pull-off test), microhardness and wear resistance (pin-on-disc test). Structure of coatings was studied using optical and electron microscopy. The coating Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr