вывод, что упрочнение твердого сплава методом нанесения износостойкого покрытия TiN и последующей имплантации ионов N^+ и Pb^+ позволяет повысить износостойкость режущего инструмента, уменьшить скорость зарождения и распространения микротрещин в инструментальном материале.

SUMMARY

It was fullfilled an analysis of the influence of the combined method of alloying on wear stability of the cutting instrument.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей.-М.: Машиностроение, 1987.-305 с.
2. Белый А.В.,Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев.-М.: Машиностроение,1991.-208 с.

Поступила в редколлегию 26 мая 1995 г.

УДК 534.1: 681.5

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СКАНИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

Пузько И.Д., канд. техн. наук., Хворост В.А., доц.

При решении задач вибродиагностики, разработке новых вибротехнологий, проведении виброиспытаний машин, приборов и аппаратуры возникает необходимость регистрации амплитудно- и фазо-частотных характеристик с целью выявления резонансных пиков, определения типа каждого пика, идентификации резонансных частот, инерционно-жесткостных и диссипативных параметров [1].

Одним из методов, применяемых для таких целей, является метод сканирования частоты возбуждающего воздействия. На применении такого метода и основано изложенное в статье решение задачи структурной и параметрической идентификации моделей, адекватных колебательной системе с одной степенью свободы [1].

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1 Частотно-скоростной метод идентификации

Для резонатора, статический коэффициент W_k передачи которого с точностью до постоянного множителя равен $W_k=1/(1+jX_k)$,в работе [3] получено соотношение

$$X_k=4V\,Q_k^2/\omega_{0k}^2\,, \tag{1}$$

где V –скорость сканирования частоты, ω_{0k} , Q_k - резонансная частота и добротность соответственно k-го статического резонансного пика.

По определению для X_k имеет место соотношение

$$X_k=2(\omega-\omega_{0k})\,Q_k\,/\,\omega_{0k}, \tag{2}$$

где ω - текущая частота.

Принимая во внимание (1),(2), получим

$$\Delta_k\omega=\omega-\omega_{0k}=4V\,Q_k/\,\omega_{0k}. \tag{3}$$

При реализации двух режимов сканирования частоты со скоростями $V_1, V_2 (V_1 < V_2)$ из (3) получим

$$\omega^{\pm}_{1k}-\omega_{0k}=4V_1\,Q_k\,\mathrm{siqn}(\omega^{\pm}_{1k}-\omega_{0k})/\omega_{0k}, \tag{4}$$

$$\omega^{\pm}_{2k}-\omega_{0k}=4V_2Q_k\,\mathrm{siqn}(\omega^{\pm}_{2k}-\omega_{0k})/\omega_{0k}, \tag{5}$$

где $\omega^{+}_{1k}, \omega^{+}_{2k}, (\omega^{-}_{1k},\omega^{-}_{2k})$ – резонансные частоты k-го динамического резонансного пика при скоростях V_1,V_2 сканирования частоты в сторону возрастания (убывания) соответственно.

Из (4),(5) следует

$$Q_k = A\Delta^{\pm}_k\,\omega\,\mathrm{siqn}\,(\Delta^{\pm}_k\omega), \tag{6}$$

где
$$A=\omega_{0k}/[4(V_2-V_1)]. \tag{7}$$

Из (6) следует, что:

а) при выполнении условия $\Delta_{k(1)}\,\omega = |\omega^{\pm}_{2k(1)}-\omega^{\pm}_{1k(1)}| > \Delta_{k(2)}\,\omega = |\omega^{\pm}_{2k(2)}-\omega^{\pm}_{1k(2)}|$
имеет место неравенство $Q_{k(1)} > Q_{k(2)}$;

б) при выполнении условия $\Delta^{\pm}_{k(1)}\,\omega < \Delta^{\pm}_{k(2)}\omega$
имеет место неравенство $Q_{k(1)} < Q_{k(2)}$;

в) при выполнении условия $\Delta^{\pm}_{k(1)}\,\omega \cong \Delta^{\pm}_{k(2)}\,\omega$
имеет место приближенное равенство $Q_{k(1)} \cong Q_{k(2)}$.

В случае симметричного резонансного пика крутизна S^- дорезонансной ветви равна крутизне S^+ зарезонансной ветви. Поэтому из (4),(5) следуют соотношения:

$$\Delta^{+}_k\omega = \omega^{+}_{2k}-\omega^{+}_{1k} = \Delta^{(-)}_k\omega = \omega^{(-)}_{1k}-\omega^{(-)}_{2k}, \tag{8}$$

$$Q_k = \omega_{0k}\,/\,(\Delta^{*}_{0k}\omega), \tag{9}$$

где $\Delta^{*}_{0k}\omega=2\Delta_{0k}\omega$ - ширина полосы пропускания резонансного пика на уровне половинной мощности, а скелетная кривая делит частотную зону $\Delta^{*}_{0k}\omega$ на две равные части.

Для несимметричного резонансного пика, имеющего добротность Q_k и ширину полосы пропускания $\Delta^{*}_{0k}\omega$, рассмотрим два случая:

$$S^{-}_k > S^{+}_k\,; \quad S^{-}_k < S^{+}_k.$$

Для случая $S^{-}_k > S^{+}_k$ и при сканировании частоты возбуждающего воздействия в сторону возрастания (9) принимает вид

$$\underset{\rightarrow}{Q}^*_k = \underset{\rightarrow}{\omega}^*_{0k} / (\Delta^*_{ok}\,\omega) \qquad (10)$$

где $\underset{\rightarrow}{\omega}^*_{0k}$ выбрана таким образом, чтобы частотная зона $\Delta^*_{ok}\,\omega$ была разделена на две равные части.

Для этого случая

$$\underset{\rightarrow}{\omega}^*_{ok} > \omega_{ok}, \quad \underset{\rightarrow}{Q}^*_k > Q_k, \quad \underset{\rightarrow}{\Delta}^*_k\omega > \Delta_k\omega, \qquad (11)$$

где $\underset{\rightarrow}{\Delta}^*_k\omega$- разность резонансных частот динамических резонансных пиков при сканировании частоты возбуждающего воздействия в сторону возрастания при $S^-_k > S^+_k$.

Для случая $S^-_k < S^+_k$ и при сканировании частоты возбуждающего воздействия в сторону убывания (9) принимает вид

$$\underset{\leftarrow}{Q}^*_k = \underset{\leftarrow}{\omega}^*_{ok} / (\Delta^*_{ok}\omega), \qquad (12)$$

а частота $\underset{\leftarrow}{\omega}^*_{ok}$ выбрана таким образом, чтобы частотная зона была разделена на две равные части.

В этом случае

$$\underset{\leftarrow}{\omega}^*_{ok} < \omega_{ok}, \quad \underset{\leftarrow}{Q}^*_k < Q_k, \quad \underset{\leftarrow}{\Delta}^*_k\omega < \Delta_k\omega. \qquad (13)$$

Для случая $S^-_k > S^+_k$ соотношения (11),(13) принимают вид соответственно:

$$\underset{\rightarrow}{\Delta}^*_k\omega < \Delta_k\omega, \quad \underset{\leftarrow}{\Delta}^*_k\omega > \Delta_k\omega. \qquad (14)$$

Таким образом, соотношения (11),(13),(14) позволяют идентифицировать несимметричность резонансных пиков.

1.2 Амплитудно-частотный метод идентификации

При реалазации двух режимов сканирования частоты со скоростями V_1,V_2 для k-го статического резонансного пика из [3] получим:

$$\Delta^{\pm}_{12k}Y = Y^{\pm}_{1k} - Y^{\pm}_{2k} = A_2(Q_k\omega^{-1}_{0k})^4, \quad A_2 = 2^4(V^2_2 - V^2_1), \qquad (15)$$

где $Y^+_{1k},Y^+_{2k},(Y^-_{1k},Y^-_{2k})$ - максимумы огибающих полуразмахов колебаний динамических резонансных пиков при скоростях V_1,V_2 сканирования частоты в сторону возрастания (убывания) соответственно.

Из (15) следует, что

при $\Delta^{(1)}_{12k}Y > \Delta^{(2)}_{12k}Y$ справедливо соотношение $Q^{(1)}_k > Q^{(2)}_k$,

при $\Delta^{(1)}_{12k}Y < \Delta^{(2)}_{12k}Y$ справедливо соотношение $Q^{(1)}_k < Q^{(2)}_k$,

при $\Delta^{(1)}_{12k}Y \cong \Delta^{(2)}_{12k}Y$ справедливо соотношение $Q^{(1)}_k \cong Q^{(2)}_k$.

В случае симметричного резонансного пика $S^-_k = S^+_k$ и при учете (15) имеем

$$\Delta^{(+)}_{12k}Y \cong \Delta^{(-)}_{12k}Y\ , \qquad (14)$$

При $S_k^- > S_k^+$ имеет место соотношение $\underset{\rightarrow}{Q_k^*} > \underset{\leftarrow}{Q_k^*}$, $\Delta^{(+)}_{12k}Y > \Delta^{(-)}_{12k}Y$,

При $S_k^- < S_k^+$ имеет место соотношение $\underset{\rightarrow}{Q_k^*} < \underset{\leftarrow}{Q_k^*}$, $\Delta^{(+)}_{12k}Y < \Delta^{(-)}_{12k}Y$.

Приведенные соотношения дают возможность идентифицировать несимметричность резонансного пика.

2.ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Анализ результатов моделирования на ЭВМ, приведенных в [2], и результатов моделирования, выполненного авторами для колебательных систем с большой степенью нелинейности, приводит к обоснованию следующих методов структурной идентификации.

2.1 Частотно-скоростной метод структурной идентификации

При реализации двух режимов сканирования частоты со скоростями V_1, V_2 $(V_2 > V_1)$ справедливо

Утверждение:

а) форма k-го резонансного пика идентифицируется как линейная при условии: $[\omega^{(+)}_{2k}-\omega^{(+)}_{1k}] \cong [\omega^{(-)}_{1k}-\omega^{(-)}_{2k}]$;

б) форма k-го резонансного пика иденифицируется как нелинейная с жесткой характеристикой восстанавливающей силы при условиях:

$$\omega^{(+)}_{1k} > \omega^{(+)}_{2k},\quad \omega^{(-)}_{1k} > \omega^{(-)}_{2k};$$

в) форма k-го резонансного пика идентиицируется как нелинейная с мягкой характеристикой восстанавливающей силы при условях:

$$\omega^{(+)}_{2k} > \omega^{(+)}_{1k},\quad \omega^{(-)}_{2k} > \omega^{(-)}_{1k}.$$

2.2 Амплитудно-скоростной метод структурной идентификации

Анализ соотношений между максимумами $Y^{(+)}_{1k}, Y^{(-)}_{1k}, Y^{(+)}_{2k}, Y^{(-)}_{2k}$ огибающих полуразмахов колебаний, соответствующих частотам ω^{+}_{1k}, ω^{-}_{1k}, ω^{+}_{2k}, ω^{-}_{2k} приводит к следующему утверждению:

а) форма k-го резонансного пика идентифицируется как линейная при условии: $Y^{(+)}_{1k} \cong Y^{(-)}_{1k}$ $(Y^{(+)}_{2k} \cong Y^{(-)}_{3k})$;

б) форма k-го резонансного пика идентифицируется как нелинейная с жесткой характеристикой восстанавливающей силы при условиях:

$$Y^{(+)}_{1k} > Y^{(-)}_{1k},\ Y^{(+)}_{2k} > Y^{(-)}_{2k},\ Y^{(+)}_{1k} > Y^{(+)}_{2k},\ Y^{(-)}_{1k} > Y^{(-)}_{2k};$$

в) формах k-го резонансного пика идентифицируется как нелинейная с мягкой характеристикой восстанавливающей силы при условиях:

$$Y^{(+)}_{1k} < Y^{(-)}_{1k},\ Y^{(+)}_{2k} < Y^{(-)}_{2k},\ Y^{(+)}_{1k} > Y^{(+)}_{2k},\ Y^{(-)}_{1k} > Y^{(-)}_{2k}.$$

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрим методы определения резонансных частот статических резонансных пиков при реализации режимов сканирования частоты.

3.1 Метод односкоростного реверсивного сканирования частоты

При реализации режима возвратно-поступательного сканирования частоты по линейному закону со скоростью V из (2) следует

$$\omega_{0k}=0{,}5[\omega_{1k}^{(+)}+\omega_{1k}^{(-)}]. \qquad (17)$$

3.2 Метод двухскоростного нереверсивного сканирования частоты

При реализации двух режимов сканирования частоты со скоростями V_1, V_2, из (4),(5) следуют формулы:

$$\omega_{0k}^{(+)}=(\omega_{1k}^{(+)}V_2-\omega_{2k}^{(+)}V_1)/(V_2-V_1), \qquad (18)$$

$$\omega_{0k}^{(-)}=(\omega_{1k}^{(-)}V_2-\omega_{2k}^{(-)}V_1)/(V_2-V_1), \qquad (19)$$

$$\omega_{0k}^{\pm}=(\omega_{1k}^{(+)}V_2+\omega_{2k}^{(-)}V_1)/(V_2+V_1). \qquad (20)$$

3.3 Метод двухскоростного реверсивного сканирования частоты

При реализации четырех режимов сканирования частоты со скоростями V_1, V_2 из (4),(5) следует формула

$$\omega_{0k}=\frac{\omega_{1k}^{(+)}\omega_{2k}^{(-)}-\omega_{2k}^{(+)}\omega_{1k}^{(-)}}{(\omega_{1k}^{(+)}+\omega_{2k}^{(-)})-(\omega_{2k}^{(+)}+\omega_{1k}^{(-)})} \qquad (21)$$

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Результаты теоретических исследований были проверены моделированием на ЭВМ.

4.1 Моделировались процессы при сканировании частоты в системе.

$$1\frac{d^2y}{dt^2}+10\frac{dy}{dt}+10^4y=\begin{cases}10^3\,\mathrm{siqn}(50+Vt) & \text{при } \mathrm{siqn}V=1;\\ 10^3\,\mathrm{siqn}(200-Vt) & \text{при } \mathrm{siqn}V=-1.\end{cases} \qquad (22)$$

Результаты компьютерного моделирования приведены в табл.1

Таблица 1

$V^{(+)}$	100	250	500
$V^{(-)}$	100	250	500
$\omega_m^{(+)}$	118	123	150
$\omega_m^{(-)}$	79	62	40

Результаты расчетов резонансной частоты по формулам (48),(49),(50),(51),(52) приведены в табл.2.

Таблица 2

$\omega_m^{(+)}$ / $\omega_m^{(-)}$ / ω_0 / $\delta,\%$	118 79	123 62	150 40	118 123	118 150	123 150	79 62	79 40	62 40
алго-ритм	формула (15)			формула (16)			формула (17)		
ω	98,5	92,5	95	111,6	110	96	90,3	88,8	84
δ	1,5	7,5	5,0	14,6	10,0	4,0	9,7	11,2	16,0

Продолжение таблицы 2

ω_m^{+} / ω_m^{-} / ω_0 / $\delta,\%$	118 40	118 40	123 79	118 79	123 62	118 79	150 40	123 62	150 40
алго-ритм	формула (18)			формула (19)					
ω_0	101,7	105,0	91,6	109,1		100,4		89,4	
δ	1,7	5,0	8,4	9,1		0,4		10,6	

4.2 Моделировались процессы при сканировании частоты возбуждающего воздействия на систему, описываемую уравнением

$$1\frac{d^2y}{dt^2}+5\frac{dy}{dt}+10^4y+10^6y^3=\begin{cases}10^3\,\mathrm{siqn}\,(50+Vt)\ \text{при}\ \mathrm{siqn}V=1;\\ 10^3\,\mathrm{siqn}\,(500\text{-}Vt)\ \text{при}\ \mathrm{siqn}V=-1.\end{cases} \qquad (23)$$