

8. Чахмахсазян Е. А. и др. Машинный анализ интегральных схем.— М.: Сов. радио, 1974.
9. Стукалин Ю. А. Моделирование на ЭЦВМ токоуправляемых элементов при узловом методе анализа схем.— В кн.: Автоматизация проектирования радиоэлектронной аппаратуры на промышленных предприятиях. (Тез. докл. научн.-техн. конф., 22—24 ноября 1977 г.). Запорожье: Запорож. машиностроит. ин-т им. В. Я. Чубаря, 1977, с. 17—18.
10. Jimenez A. J., Director S. W. New families of algorithms for solving nonlinear circuit equations.— IEEE Trans. on Circ. and Syst., 1978, v. CAS-25, N 1, p. 1—7.
11. Бахов В. А., Ильин В. Н., Фролкин В. Т. Алгоритмы расчета нелинейных схем методом подсхем с использованием итераций по Ньютону.— Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1974, т. XVII, № 6, с. 5—15.
12. Гурарий М. М., Ермак В. В., Зарудный Д. И., Русаков С. Г. Применение метода многополюсных подсхем в программах анализа электрических характеристик больших интегральных схем.— Упр. сист. и маш., 1973, № 5, с. 55—58.

*Поступила в редакцию 19 апреля 1984 г.*

УДК 620.179.13

А. Н. МАЛОВ, Д. И. ПУНДА

*(Куйбышев)*

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЗДЕЛИЙ ПОДШИПНИКОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Основным достоинством тепловизионных систем, широко применяемых в настоящее время в науке и технике, является возможность визуализации тепловых полей тел, нагретых до комнатной температуры и выше [1—4]. При наличии соответствующих моделей и методик расчета анализ этих полей позволяет получить информацию о внутреннем состоянии и объемной структуре исследуемого объекта. Функциональные возможности тепловизионной интроскопии существенно возрастают при проведении так называемого активного теплового контроля (АТК) — визуализации теплового поля объекта, нагреваемого внешним источником энергии. АТК позволяет выявить дефекты типа нарушений сплошности в однородных и композитных материалах [5—8]. Во многих практически интересных ситуациях нагрев контролируемого образца может осуществляться и за счет диссипации энергии его собственного движения или механического напряжения, возникающих в процессе эксплуатации, в тепловую энергию. При этом оказывается возможным наблюдение процесса развития усталостных трещин [9] и колебательных мод твердотельных образцов [10].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы оценить возможности тепловизионных систем для контроля изделий подшипниковой промышленности и классификации дефектов колец подшипников по степени их влияния на изнашивание последних.

Целесообразность применения тепловизионного контроля для оценки качества изделий данного типа обуславливается большей информативностью «теплого» изображения по сравнению с оптическим, поскольку дефекты, ухудшающие эксплуатационные характеристики подшипников (трещины, раковины, остатки абразива, геометрические отклонения и т. п.), приводят, как правило, к повышению трения и дополнительным механическим напряжениям, а следовательно, и к большему нагреву дефектных участков по сравнению с бездефектными. Таким образом, при регистрации теплового поля поверхности подшипника непосредственно будут выделяться участки, наиболее опасные для его работы. В противоположность этому оптический метод контроля, широко используемый в промышленности, требует наличия дополнительной теории, связы-

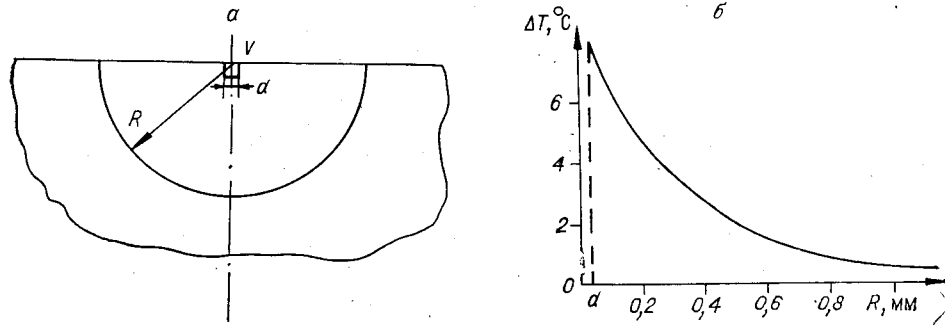


Рис. 1.

вающей оптическое изображение объекта с его эксплуатационными характеристиками.

Задача решается в квазистационарном приближении. Известно, что если некоторая область объемом  $V$  подвергается периодическому сжатию с частотой  $f$  Гц и напряжение внутри объема меняется по гармоническому закону от 0 до  $\sigma_0$ , то при декременте затухания материала  $\delta$  в этом объеме за время  $\tau = f^{-1}$  рассеивается тепловая энергия  $\Delta W = \delta E \sigma_0^2 V / 2$ , где  $E$  — модуль Юнга. Поэтому объем  $V$ , сжимающийся с частотой  $f$ , представляет собой тепловой источник мощностью

$$P_\sigma = \Delta W f = \delta E \sigma_0^2 V f / 2. \quad (1)$$

Если этот тепловой источник является частью полубесконечной твердой среды (рис. 1, а), то, рассматривая в этой среде полусферу радиусом  $R \gg V^{1/3} = d$ , можно показать, что отвод тепловой энергии происходит в основном за счет теплопроводности, а теплоотводом за счет конвекционного теплообмена и теплового излучения в области вокруг дефекта можно пренебречь (см. аналогичные оценки в [5]). Поэтому через полусферу радиусом  $R$  будет отводиться тепловая энергия мощностью

$$P_x = \chi \nabla_r T(R) 2\pi R^2, \quad (2)$$

где  $\nabla_r T(R)$  — градиент температуры на поверхности сферы,  $\chi$  — коэффициент теплопроводности среды.

В стационарном случае тепловая энергия, проходящая через полусферу  $R$ , создается в основном тепловым источником мощностью  $P_\sigma$ . Приравняв уравнение (1) к (2), получим выражение для разности температур  $\Delta T(R)$  между поверхностями сферы и теплового источника  $d = V^{1/3}$ :

$$\Delta T(R) = T(d) - T(R) = (P_\sigma / 2\pi\chi) (d^{-1} - R^{-1}). \quad (3)$$

График этой зависимости показан на рис. 1, б.

Уравнение (3) можно использовать для оценки разности температур и в случае слоя толщиной  $h$  ( $h \gg d$ ) между точкой  $A$  (непосредственно под дефектом) и точкой  $B$ , расположенной на расстоянии  $l_{AB}$  от  $A$  ( $A$  и  $B$  находятся на противоположной стороне относительно дефекта). Тогда

$$\Delta T_{AB} \approx T(h) - T(\sqrt{l_{AB}^2 + h^2}) \approx P_\sigma / 2\pi h \chi \quad (4)$$

при  $l_{AB} > h$ . Это выражение позволяет, по крайней мере, качественно оценивать разность температур между точками  $A$  и  $B$ , если расстояние между ними превышает линейное разрешение тепловизионной установки.

Рассмотрим шарикоподшипник с закрепленным наружным кольцом радиусом  $R_0$  (от центра до рабочей поверхности) и внутренним — радиусом  $r_0$ , вращающимся с частотой  $f_0$ . Пусть на беговой дорожке наружного кольца имеется выступ высотой  $d$ . Шарики подшипника будут казаться дефекта с частотой

$$f = n(r_0 / (r_0 + R_0)) f_0, \quad (5)$$

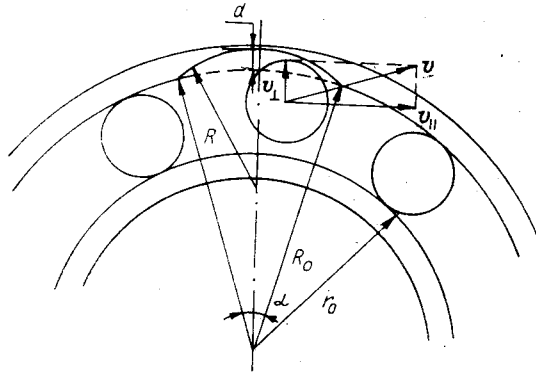


Рис. 2.

где  $n$  — полное число шариков. Будем считать, что при максимальном сжатии дефект уменьшается наполовину и деформации подвергается небольшая область размером  $\sim 2d$  (т. е.  $V = 8d^3$ ),  $\sigma_0 \approx (2E)^{-1}$ . В этом случае из уравнений (1) и (4) следует

$$\Delta T \approx \delta d^3 f / 2\pi h \chi E \quad (6a)$$

( $h$  — толщина внешнего кольца подшипника).

Оценим минимально необходимую частоту вращения подшипника, при которой можно увидеть на тепловизоре такой дефект. Запишем уравнение (6a) в следующем виде:

$$d^3 f = (1/\delta) \Delta T E 2\pi h \chi. \quad (6б)$$

При  $\delta = 0,05$ ,  $E^{-1} = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\chi = 46$  Вт/(м · К),  $h \approx 1$  мм и температурном разрешении тепловизора  $T = 0,06$  К [10] получим  $d^3 f = 1,7 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup> · Гц. Если  $d = 10$  мкм, а параметры подшипника  $R_0 = 18$  мм,  $r_0 = 10$  мм, то  $f_0 = 500$  Гц.

Допустимая рабочая частота подшипника таких размеров обычно составляет 50 000—60 000 об./мин, или около 1 кГц. Таким образом, с помощью тепловизора с вышеуказанным температурным разрешением возможно обнаружение и более мелких дефектов, чем с  $d = 10$  мкм.

Дефекты рассмотренного типа возникают из-за различных причин: остатков шлифующего абразива, микрообломков от обрабатывающего инструмента, твердых включений в смазку подшипника и т. п. Совершенно аналогичные оценки можно привести и для дефектов, находящихся на беговой дорожке внутреннего кольца подшипника.

Рассмотрим дефекты другого типа, вызванные, например, ошибками в изготовлении наружного кольца (рис. 2), которые приводят к повышению уровня шума при работе подшипника, высокому их износу и, как следствие, уменьшению времени эксплуатации. Пусть вращение подшипника проводится, как описано выше. Из рис. 2 следует, что  $d \approx R(1 - \cos \alpha/2)$ . Дефекты такого типа можно разделить на два вида. Дефекты первого вида возникают из-за деформации кольца, когда  $R \gg d$ , и в этом случае  $d \approx R_0 \alpha^2 / 8$ . Дефекты второго вида соответствуют поперечным царапинам на беговой дорожке, т. е. появляются при  $R \approx d$  или  $\alpha \approx 2d/R_0$ .

Очевидно, что дополнительные механические напряжения кольца возникают из-за ударов шариков о деформированный участок кольца. Часть кинетической энергии шарика, вызывающая напряжение кольца в районе дефекта по порядку величины, равна

$$\Delta W_{\perp} = mv_{\perp}^2 / 2 \approx mv^2 \alpha^2 / 2, \quad (7)$$

$m$  — масса шарика. Поэтому можно записать

$$mv_{\perp}^2 / 2 \approx (E/2) \int \sigma_0^2(r) d^3 r, \quad (8)$$

где  $\sigma_0(r)$  — амплитуда напряжения в точке  $r$  кольца. Отсюда получим

$$P_0 \approx \delta mv^2 \alpha^2 f / 2. \quad (9)$$

Здесь  $f$  — частота ударов, связанная с частотой вращения подшипника  $f_0$  уравнением (5). При вращении внутреннего кольца с частотой  $f$  ли-

нейная скорость движения шарика составляет  $v = \pi r_0 f_0$ , и тогда

$$P_\sigma \approx (\delta/2) \pi^2 m r_0^3 f_0^3 \alpha^3 n / (r_0 + R_0), \quad (10)$$

где  $m = (4/3) \pi \rho (R_0 - r_0)^3 / 2 \approx \rho (R_0 - r_0)^3 / 2$  — масса шарика.

В случае дефектов геометрии кольца первого вида ( $R \gg h$ ), действуя, как и при получении уравнения (3), т. е. исходя из равенства  $P_\sigma = P_x$ , будем иметь

$$f^3 d \approx (\chi \Delta T h / \delta \rho n) (R_0 (r_0 + R_0) / \pi (R_0 - r_0)^3 r_0^3), \quad (11)$$

где  $h$  — толщина кольца.

При  $r_0 = 10$  мм,  $R_0 = 18$  мм,  $h = 1$  мм,  $n = 10$ ,  $d = 10$  мкм и  $\Delta T = 0,06$  К получим  $f_0 = 2,6 \cdot 10^2$  Гц  $\approx 15\,000$  об./мин, что, по крайней мере, в несколько раз меньше рабочей частоты подшипника.

В случае дефектов другого вида — «царапин» ( $R \approx d$ ) — получается соотношение

$$f_0^3 d^2 \approx (2 \chi \Delta T h / \delta \rho n) (R_0^2 (r_0 + R_0) / \pi (R_0 - r_0)^3 r_0^3). \quad (12)$$

При тех же числах, что и выше,  $f_0 = 4,1 \cdot 10^2$  Гц  $\approx 30\,000$  об./мин. Отсюда следует, что с помощью тепловизора сложнее зарегистрировать дефект типа царапины, чем отклонение беговой дорожки от заданной геометрической формы.

Проведенный анализ показывает, что характеристики современных тепловизионных систем позволяют исследовать влияние различных дефектов на процесс эксплуатации изделий подшипниковой промышленности.

В связи с этим представляется целесообразным комплексное тепловизионное исследование подшипников, которое даст информацию о физических процессах, протекающих при работе подшипника, и позволит оценить влияние различных типов дефектов на его рабочие характеристики. Влияние неоднородности излучательной способности по поверхности образца на действительное температурное разрешение тепловизора можно устранить дополнительной цифровой обработкой тепловизионного изображения.

Авторы благодарят В. Л. Емельянова и Б. В. Иванова за полезные обсуждения и консультации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В. П., Горбунов В. И. Тепловые методы неразрушающего контроля многослойных структур. — Дефектоскопия, 1981, № 4, с. 4.
2. Жуков А. Г., Горюнов А. И., Кальфа А. А. Тепловизионные приборы и их применение. — М.: Радио и связь, 1983.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
4. Брагина Л. А. и др. Контроль дефектов диффузионной сварки В. Э. активным тепловым методом. — Дефектоскопия, 1983, № 5, с. 69.
5. Вавилов В. П., Финкельштейн С. В. Методика теоретической оценки предельной чувствительности активного теплового контроля. — Там же, с. 65.
6. Бекешко И. А. Активный тепловой контроль неметаллических материалов. — Дефектоскопия, 1981, № 9, с. 86.
7. Карпельсон А. Е. и др. Обнаружение отслоений в многослойных изделиях тепловым методом с использованием тепловизора. — Дефектоскопия, 1976, № 5, с. 59.
8. Вавилов В. П., Ширяев В. В. Способ определения поперечных размеров внутренних дефектов при тепловом методе контроля. — Дефектоскопия, 1979, № 11, с. 101.
9. Бородин Ю. П. и др. О некоторых применениях тепловидения в механике сплошных сред. — В кн.: Тепловидение: Сборник/Под ред. Н. Д. Куртева. М.: МИРЕА, 1982, № 4, с. 87.
10. Остроменский П. И. Тепловой способ исследования упругих колебаний твердых тел. — Автометрия, 1981, № 3, с. 116.

Поступила в редакцию 28 апреля 1983 г.