

Литература

1. Александров М.П. Грузоподъемные машины.-М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана-Высшая школа, Москва 2000.-552с.
2. Алексеева Л.А., Бредихин Ю.Р., Волобуева Л.А. Теория и практика подъема – Изд. «Наукова думка», Киев 1975 – 352 с.

Виконано аналіз конструкцій індукторів для індукційно-теплового збирання підшипникових вузлів. Для оцінювання взаємовпливу досліджуваних факторів і їх прогнозування застосован факторний аналіз

Ключові слова: індукційно-теплове збирання, підшипниковий вузол, факторний аналіз

Проведен анализ конструкций индукторов для индукционно-тепловой сборки подшипниковых узлов. Для оценки взаимовлияния исследуемых факторов и их прогнозирования применен факторный анализ

Ключевые слова: индукционно-тепловая сборка, подшипниковый узел, факторный анализ

The analysis of constructions of inductors is conducted for the induction-thermal assembling of bearing knots. For the estimation of interferences of the investigated factors and their prognostication a factor analysis is applied

Keywords: induction-thermal assembling, bearing knot, factor analysis

УДК 621.753.792.865

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ИНДУКЦИОННО-ТЕПЛОВОЙ СБОРКИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

М.К. Кравцов

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой*
 Контактный тел.: (057) 733-79-01

В.Т. Акимов

Кандидат технических наук, доцент*
 Контактный тел.: (057) 733-78-20

*Кафедра «Сопrotивление материалов и техническая механика»
 Украинская инженерно-педагогическая академия

О.В. Акимов

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
 Кафедра «Литейное производство»
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
 ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
 Контактный тел.: (057) 707-63-20

1. Введение

Индукционный нагрев подшипников перед сборкой подшипниковых узлов является одним из прогрессивных направлений, поскольку повышает производительность труда, улучшает культуру сборочного производства и обеспечивает возможность комплексной механизации процесса сборки.

Эффективность использования электроиндукционного нагрева в значительной степени зависит от конструкции нагревательного оборудования (индуктора). Проблема распределения энергии между внешним и внутренним кольцами подшипника имеет как экономический, так и технический аспекты [1]:

- Недостаточный нагрев внутреннего кольца при чрезмерном перегреве внешнего приводит к излишним

затратам энергии на нагрев, потому что при посадке необходимо обеспечить определенную (необходимую) температуру на внутреннем кольце подшипника;

- Значительный перекося температур внутреннего и внешнего колец вызывает нарушение технических характеристик подшипника;

- Изменение геометрии магнитной системы и размещения обмоток индуктора существенно влияют на распределение температуры на кольцах подшипника.

2. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследований

При нагреве подшипника следует получать наиболее равномерное распределение температуры по его массе, что в значительной степени зависит от расположения подшипника относительно магнитопроводов. Если поместить подшипник между верхним и нижним магнитопроводами (рис. 1а) без сердечника, то равномерного нагрева по радиусу не будет, так как в зону действия магнитного потока попадает наружное кольцо; внутреннее кольцо оказывается вне зоны основного магнитного потока и нагревается от магнитного потока рассеивания и теплопередачи.

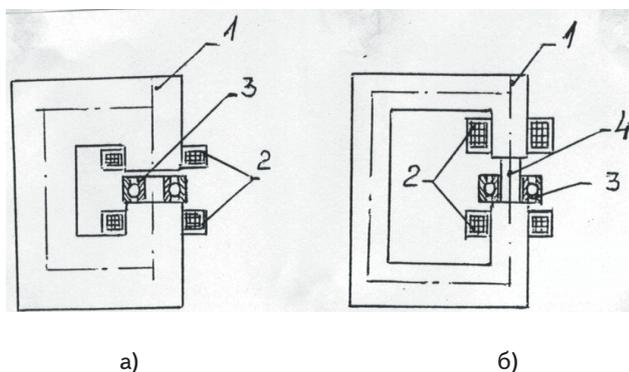


Рис. 1. Принципиальная схема индуктора: а – замыкание магнитопровода на торцы подшипника; б – замыкание магнитопровода через вставку; 1 – магнитопровод; 2 – катушки; 3 – нагреваемый подшипник; 4 – вставка цилиндрическая

Во избежание заклинивания тел качения и появления температурных деформаций в элементах подшипников было бы желательно обеспечить одинаковый нагрев внутреннего и наружного колец, однако, вследствие различия их геометрических параметров кольца в индукционной установке нагреваются по-разному. Как правило, внутренне кольцо нагревается до более высокой температуры. Таким образом, при индукционном нагреве существует температурный градиент между внутренним и наружным кольцами ($\Delta t = t_v - t_n$) подшипника (рис. 2), который является одним из основных критериев при создании индукционных нагревательных установок.

Для выравнивания температуры применяются магнитопроводящие сердечники (вставки) (рис. 1.б), которые направляют часть магнитного потока через внутреннее кольцо. В индукторе со вставкой основной магнитный поток проходит по вставке, что обеспечивает преимущественный нагрев внутреннего кольца.

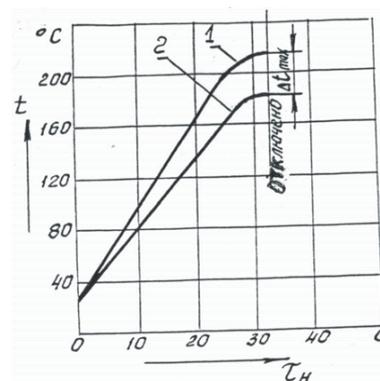


Рис. 2. Изменение температуры колец подшипника в процессе индукционного нагрева: 1 – внутреннее кольцо; 2 – наружное кольцо

Вставки могут быть цилиндрическими, ступенчатыми и коническими. Согласно [1], наиболее приемлемой является цилиндрическая вставка. Поскольку подшипники разных серий имеют при одинаковом внутреннем диаметре d_v разную высоту, для каждого типоразмера подшипника желательно иметь соответствующую вставку определенного диаметра и длины, чтобы между вставкой и внутренним отверстием в подшипнике обеспечивался минимальный зазор и торец подшипника располагался на оптимальном расстоянии от торца магнитопровода. Следует заметить, что для обеспечения универсальности нагревателя необходимо много вставок, что значительно усложняет эксплуатацию. Необходимо иметь набор вставок, каждый из которых подходит до ограниченного количества типоразмеров подшипников в определенном диапазоне посадочного диаметра. Необходимо при изменении типоразмера подшипников заменять вставку, что требует затраты рабочего времени. Уменьшить число вставок можно за счет применения подвижных магнитопроводов. Для этого выполняют подвижными либо один верхний, либо оба – верхний и нижний – магнитопроводы, придав им форму вставок, проходящих в отверстия подшипников (преимущественно больших диаметров) (рис. 3).

В научно-исследовательской лаборатории сборочных процессов Украинской инженерно-педагогической академии (г. Харьков) разработана и внедрена в промышленность индукционная установка (рис. 4), в которой подшипник находится в С-образном индукторе с подвижными магнитопроводами (внешним или внутренним в зависимости от посадочного диаметра). Магнитопроводам придается форма вставок, которые проходят в отверстие подшипников (преимущественно больших диаметров).

С помощью такой магнитной системы можно обеспечить необходимое расстояние h и в это же время внутренний магнитопровод (верхний или нижний в зависимости от посадочного диаметра) будет пронизывать подшипник.

Роль вставки также может играть пронизывающий магнитопровод, который перемещается вдоль оси в отверстия, просверленном в основном магнитопроводе; в этом случае на той же установке можно осуществить подогрев подшипников сравнительно небольших размеров.

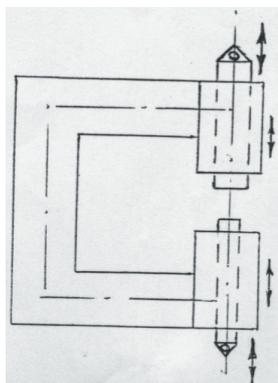


Рис. 3. Схема магнитной цепи установки с подвижными магнитопроводами и вставками

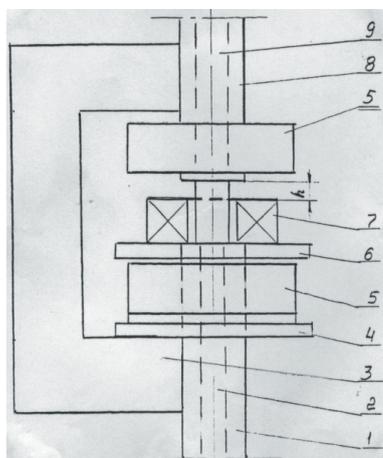


Рис. 4. Положение подшипника качения в замкнутом С-образном индукторе: 1 – нижний магнитопровод; 2 – нижний внутренний подвижный магнитопровод; 3 – С-образный неподвижный магнитопровод; 4 – текстолитовая прокладка; 5 – индукционная катушка; 6 – текстолитовая плита; 7 – нагреваемый подшипник; 8 – верхний подвижный магнитопровод; 9 – верхний внутренний подвижный магнитопровод

Магнитная система этого нагревателя, как подтверждают эксперименты, универсальна и является оптимальным вариантом для нагрева подшипников под сборку подшипниковых узлов.

В процессе разработки и внедрения в промышленность индукционных нагревательных установок с 1960 года по настоящее время были проведены исследования:

- измерение фактической величины градиента Δt температур внутреннего и наружного колец подшипника в процессе индукционного нагрева;
- определение влияния на температуру и скорость нагрева диаметра d_c вставки, пронизывающей подшипник;
- определение зависимости величины градиента Δt температур колец от расстояния h (рис. 4) между нижним торцом подвижного магнитопровода и верхним торцом нагреваемой детали;
- определение влияния на температуру колец подшипника и градиент Δt массы подшипника и радиального зазора Δr между вставкой (сердечником) и внутренним кольцом подшипника.

3. Основной материал

В качестве объектов исследования процесса нагрева использовались стандартные шариковые и роликовые радиальные подшипники ([3], с.55, табл. 1 и 2). Результаты исследования в качестве примера приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты испытания шарикоподшипника 216 к

Величина: зазора Δr , расстояния h , диаметра d_c мм	$K = \frac{d_c}{d_b}$	Время нагрева τ_n, c	Показания термопар, °C		Градиент $\Delta t = t_n - t_{\text{н}}$ °C	Скорости нагрева колец между замерами, °C/c	
			Внутреннее кольцо, t_b	Наружное кольцо, t_n		Внутреннее	Наружное
$\Delta r = 2,5$ $h = 74$ $d_c = 75$	0,938	0	22	22	8	13,2	11,6
		5	88	80			
		10	140	130			
		15	180	168			
		20	195	175			
$\Delta r = 5$ $h = 84$ $d_c = 70$	0,875	0	22	22	9	12,4	10,6
		5	84	75			
		10	135	120			
		15	178	160			
		20	185	170			
$\Delta r = 5$ $h = 89$ $d_c = 70$	0,875	0	24	24	8	11,8	10,2
		5	83	75			
		10	132	125			
		15	170	158			
		20	180	170			
$\Delta r = 15$ $h = 74$ $d_c = 50$	0,625	0	22	22	6	10,8	9,6
		5	76	70			
		10	130	125			
		15	170	155			
		20	182	170			
$\Delta r = 15$ $h = 214$ $d_c = 50$	0,625	0	21	21	10	9,8	7,8
		5	70	60			
		10	122	115			
		15	165	150			
		20	180	165			

Согласно исследованиям [1,2], проведенным на универсальной установке для индивидуального нагрева подшипников:

- абсолютные значения температур колец находятся в зависимости от времени нагрева близкой к линейной, однако, скорость нагрева внутреннего и наружного колец различна;
- скорость нагрева у роликоподшипников меньше, чем скорость нагрева шарикоподшипников того же размера, так как последние имеют меньшую массу;
- скорости нагрева колец и градиент температур зависит от массы подшипника, а также от радиального зазора между сердечником индуктора и внутренним кольцом подшипника;
- при увеличении радиального зазора скорость нагрева несколько замедляется, а градиент температур возрастает;
- при уменьшении диаметра сердечника на 35-40% от диаметра внутреннего кольца температура колец уменьшается на 10%;

- увеличение расстояния между нижним торцом верхнего магнитопровода и верхним торцом подшипника сопровождалось снижением скорости нагрева и увеличением перепада температур.

Таблица 2

Результаты испытания роликоподшипника 2216

Величина: зазора Δr, расстояния h, диаметра d _c мм	K = $\frac{d_c}{d_b}$	Время нагрева τ _н , с	Показания термопар, °C		Градиент Δt = t _в - t _н , °C	Скорости нагрева колец между зазорами, °C/с	
			Внутреннее кольцо, t _в	Наружное кольцо, t _н		Внутреннее	Наружное
Δr = 2,5 h = 74 d _c = 75	0,938	0	22	22	4	2,4	2
		10	46	42		2,4	1,8
		20	70	50		2,2	2,0
		30	92	78		2,3	1,7
		40	115	95		2,5	2,2
Δr = 5 h = 84 d _c = 70	0,875	0	22	22	2	2	1,8
		10	42	40		2,3	1,5
		20	65	55		2,5	2,3
		30	90	80		2	1,8
		40	110	98		2,5	1,7
Δr = 15 h = 74 d _c = 50	0,625	0	22	22	0	1,8	1,8
		10	40	40		2	1,2
		20	60	52		7	2,5
		30	85	78		10	2,0
		40	105	95		25	2,0
50	130	105	25	2,0			

Для оценки взаимовлияния исследуемых факторов и их прогнозирования может быть применен факторный анализ, целью которого является исследование влияния отдельного фактора на тот или иной параметр (качество изделия, процесса). При этом факторам придают значения таким образом, чтобы на основании эксперимента можно было бы математически выразить их влияние и сравнить между собой, а также оценить их действие при различных случайных колебаниях.

Представим температуру нагрева внутреннего кольца подшипника T_в (или градиент температур Δt) как некоторую линейную функцию исследуемых факторов A, B, C и D

$$T_v = aA + bB + cC + dD + e \tag{1}$$

При этом известны из эксперимента возможные значения исследуемых факторов, которые обозначены через A_i, B_i, C_i и D_i. Неизвестные коэффициенты a, b, c, d и e определяем по методу наименьших квадратов по известным экспериментальным значениям T_{вi} (или Δt_i) для достаточно большого числа сочетаний факторов A_i, B_i, C_i и D_i из условий минимума среднего квадрата отклонения:

$$\sigma^2(a, b, c, d, e) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (aA_i + bB_i + cC_i + dD_i + e + T_{vi})^2 \tag{2}$$

здесь n – число сочетания факторов.

Взяв частные производные по каждому из коэффициентов a, b, c, и d и приравняв их к нулю, после преобразований получим систему пяти линейных уравнений с пятью неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} a \sum_{i=1}^n A_i^2 + b \sum_{i=1}^n A_i B_i + c \sum_{i=1}^n A_i C_i + d \sum_{i=1}^n A_i D_i + e \sum_{i=1}^n A_i &= \sum_{i=1}^n A_i T_i \\ a \sum_{i=1}^n B_i A_i + b \sum_{i=1}^n B_i^2 + c \sum_{i=1}^n B_i C_i + d \sum_{i=1}^n B_i D_i + e \sum_{i=1}^n B_i &= \sum_{i=1}^n B_i T_i \\ a \sum_{i=1}^n C_i A_i + b \sum_{i=1}^n C_i B_i + c \sum_{i=1}^n C_i^2 + d \sum_{i=1}^n C_i D_i + e \sum_{i=1}^n C_i &= \sum_{i=1}^n C_i T_i \\ a \sum_{i=1}^n D_i A_i + b \sum_{i=1}^n D_i B_i + c \sum_{i=1}^n D_i C_i + d \sum_{i=1}^n D_i^2 + e \sum_{i=1}^n D_i &= \sum_{i=1}^n D_i T_i \\ a \sum_{i=1}^n A_i + b \sum_{i=1}^n B_i + c \sum_{i=1}^n C_i + d \sum_{i=1}^n D_i + e \sum_{i=1}^n 1 &= \sum_{i=1}^n T_i \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

В уравнениях (2) и (3):

$$-A_i = K_i = \frac{d_{ci}}{d_{bi}}$$

здесь d_{ci} – диаметр вставки, см; d_{bi} – внутренний диаметр подшипника, см.

Зная K_i, можно определить зазор между вставкой и внутренним диаметром подшипника:

$$\Delta r_i = \frac{d_{bi} - d_{ci}}{2} = \frac{d_{bi}}{2} \left(1 - \frac{d_{ci}}{d_{bi}} \right) = \frac{d_{bi}}{2} (1 - K_i) \text{ см.}$$

- B_i = Δt_i - градиент температуры между зазорами температуры, °C;

- C_i = h_i - расстояние между нижним торцом верхнего магнитопровода и верхним торцом подшипника, см;

- D_i = τ_н – время нагрева, с.

Некоторые значения факторов A_i, B_i, C_iD_i и T_{вi} приведены в табл. 1 и 2.

Решив систему уравнений (3), определяют по величине и знаку неизвестные коэффициенты a, b, c, d, e и, следовательно, зависимость температуры нагрева внутреннего кольца подшипника T_в от случайных факторов:

$$T_v = aA + bB + cC + dD + e \tag{4}$$

Для подшипников легкой серии (шарикоподшипник № 216 к и роликоподшипник № 2216) при параметрах Δr = 5 мм, h = 84 мм и d_c = 70мм.

(K = $\frac{d_c}{d_b} = 0,875$) в таблице № 3 приведены вычисленные значения коэффициентов a, b, c, d, и e.

Таблица 3

Значения коэффициентов по результатам экспериментов

Номера подшипников	Коэффициенты				
	a	b	c	d	e
Шарикоподшипник № 216к	- 146,39	4,35	3,51	5,01	119,94
Роликоподшипник № 2216	- 164,94	0,47	11,09	2,124	70,88

Для установления оптимальных значений коэффициентов (формулы 3, 4) необходимо дальнейшее накопление и анализ экспериментальных данных при индукционно-тепловой сборке подшипниковых узлов (группа подшипников легкой, средней и тяжелой серий).

Аналогичные уравнения (3, 4) можно составить для градиента температуры

$$\Delta t = f(K, h, T_v, T_{\text{нор}}) \quad (5)$$

4. Заключение

Знание функций (4, 5) позволит выявить влияние исследуемых факторов на T_v и Δt , оценить степень влияния каждого фактора (в том числе массы подшипника, скорости нагрева колец и т.д.), т.е. значимость каждого фактора, а также прогнозировать возможные значения T_v и Δt . Это позволит внести необходимые изменения в конкретную конструкцию индукционного нагревателя.

Литература

1. Отчет (заключительный) о научно-исследовательской работе по теме «Исследование высокопрочных соединений с натягом и оптимизация параметров, обеспечивающих возможность создания унифицированного нагревательного оборудования для сборки подшипниковых узлов» № Гос. Регистрации 01965002130, 1988 г. УИПА, Харьков.
2. Кравцов М.К., Акимов О.В., Акимов В.Т. Совершенствование процесса сборки узлов подшипников качения: материалы II междунар. научн.-практ. конф. «Стратегические вопросы мировой науки -2007» - Днепропетровск, 2007 = Т.6 – С.16-18.
3. Кравцов М.К., Акимов О.В., Акимов В.Т. Уточненный расчет деформаций подшипников качения при индукционно-тепловой сборке подшипниковых узлов. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2005. - № 5/2(17). – С.52-57.