

Н.К. Резниченко, д.т.н., проф.

Е.Н. Резниченко, к.п.н., доц.

Л.В. Николенко, инженер

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Приведены результаты исследования влияния конструкции изделия на эффективность индукционного нагрева.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, стандартная посадка, натяг, технологичность, энергосбережение.*

Введение.

Соответствие конструкции изделия тем или иным технологиям, для сборочных, и соответственно, ремонтных производств с соответствующими типажом оборудования, является важнейшим фактором экономии трудовых и энергетических ресурсов. Оно во многом определяет и качество получаемых изделий.

Размеры соединений, величины натягов и допустимые температуры нагрева металла обуславливают область применения технологии сборки с использованием индукционного нагрева. Конфигурация и пространственная форма деталей, конструкция соединения являются факторами применимости тех или иных технологических схем сборки или разборки.

Обзор последних источников исследований и публикаций.

К известным требованиям к конструкции составных частей – деталей, связанным с их обработкой, контролем качества и др., для технологий, использующих индукционный нагрев, следует добавить требование минимального расхода энергии.

Расход энергии при технологиях использующих нагрев достаточно высок. При индукционном нагреве он может быть существенно снижен поскольку возможно производить локальный нагрев [1, 2, 3]. Рассмотрим, как может уменьшаться расход тепловой энергии в зависимости от технологичности конструкции детали по показателю энергосбережения.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

Как известно, при локальном нагреве части детали в материале вследствие градиента температур возникают температурные напряжения. Определим затраты тепловой энергии в зависимости от размерных соотношений и конфигурации нагреваемых детали которые необходимы для компенсации натяга.

Постановка задачи.

Основной задачей является исследование возможной экономии энергии при нагреве ступенчатыхосесимметричных деталей с учетом возникающих напряжений.

Основной материал и результаты.

Конструкция любого изделия должна отвечать, в первую очередь ее функциональному назначению. Но при этом, с точки зрения технологии, к ней предъявляются сборкой или разборкой определенные требования. Для соединений с натягом они включают требования назначения стандартных посадок, удобства манипулирования и базирования деталей. На основании анализа имеющихся общих требований к технологичности различных сборочных единиц (ГОСТ 14.201-8), можно сформулировать некоторые требования к конструкции сборочной единицы, связанные с использованием нагрева. Требования к составу:

сборочная единица должна расчленяться на рациональное число составных частей с учетом принципа агрегатирования;

сборка или разборка изделия не должна обуславливать применения сложного технологического оснащения;

конструкция и ее месторасположение в изделии должна соответствовать требованиям механизации и автоматизации;

конструкция сборочной единицы должна предусматривать базовую составную часть, которая является основной для расположения остальных составных частей; базовая составная часть должна быть удобной для правильной установки на рабочем месте в стапеле, приспособлении, на рабочем столе, сборочной площадке и пр;

компоновка сборочной единицы должна позволять производить сборку или разборку при неизменном базировании составных частей, обеспечивать удобный доступ к местам, требующим контроля, регулировки и проведения других работ, регламентированных технологией подготовки изделия к использованию по назначению, техническому обслуживанию и ремонту;

компоновка сборочной единицы и способы соединения должны обеспечивать легкосъемность составных частей с малым ресурсом (материальным и энергетическим).

Таблица 1. Размеры колец, вид посадки, необходимая температура нагрева и расход энергии при их сборке с нагревом

d, мм	D _H , мм	l, мм	$l^* = l/d$	Тип посадки	N, мм	$\Delta T, ^\circ C$	W, кДж
45	67,5	25	0,556	n6	0,0671	193,4	35,759
50	75	27	0,540	n6	0,0707	190,8	47,040
55	82,5	29	0,527	p6	0,0742	197,9	63,404
60	90	31	0,517	r6	0,0775	199,2	81,202
65	97,5	33	0,508	r7	0,0806	205,5	104,656
70	105	35	0,500	„	0,0837	194,6	121,905
75	113	37	0,493	„	0,0866	185,0	140,664
80	120	39	0,488	„	0,0894	190,7	173,848
85	128	41	0,482	„	0,0922	182,3	197,233
90	135	43	0,478	„	0,0949	174,8	222,307
95	143	45	0,474	„	0,0975	167,9	249,102
100	150	47	0,470	„	0,1000	164,3	282,124
105	158	49	0,467	„	0,1025	158,6	312,871
110	165	50	0,455	„	0,1049	153,3	338,671
120	180	55	0,458	„	0,1095	154,0	445,527
130	195	58	0,446	„	0,1140	145,2	519,693
140	210	63	0,450	„	0,1183	138,7	625,576
150	225	65	0,433	„	0,1225	131,9	704,397
160	240	70	0,438	„	0,1265	127,4	834,113
170	255	74	0,435	„	0,1304	121,9	952,442
180	270	77	0,428	„	0,1342	124,2	1132,020
190	285	81	0,426	„	0,1378	119,4	1274,953
200	300	84	0,420	„	0,1414	116,3	1426,875
220	330	90	0,409	„	0,1483	108,4	1725,081
240	360	96	0,400	„	0,1549	103,2	2084,898
280	420	106	0,379	„	0,1673	98,6	2991,288
320	480	115	0,359	„	0,1789	93,4	4019,223

Сначала проанализируем нагрев деталей типа кольцо, размеры и натяги для которых взяты по внутренним кольцам шариковых подшипников средней серии. При этом наруж-

ный диаметр кольца D определяется как $1,5d$. Кольца являются аналогами ступиц ступенчатых деталей. В расчетах использовались следующие значения параметров материала: $c = 470 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; $\gamma = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3$; $\beta = 11,5 \cdot 10^{-6} 1 / ^\circ\text{C}$.

В таблице 1 приведены данные по деталям и расходу теплоты на их нагрев, а на рис. 1 кинетика изменения температур ΔT и расхода энергии W .

Как видно, при увеличении размеров детали необходимая температура уменьшается, а потребное количество энергии все равно растет. Оценку величины требуемой тепловой энергии для компенсации натяга в осесимметричной детали ступица с диском (соответствует, например, зубчатому колесу по рис. 2) выполним с учетом возникающих температурных напряжений в зоне перехода диска в ступицу.

Количество сэкономленной тепловой энергии для компенсации натяга при неравномерном нагреве по сравнению с равномерным будет определяться соотношениями нагретых и не нагретых масс детали. Предельная максимальная экономия будет, очевидно, когда диск не нагревается, однако и напряжения будут максимальными.

Решение задачи Ляме о напряженно – деформированном состоянии полой трубы испытывающей внутреннее и внешнее давление дает для ступицы следующие значения

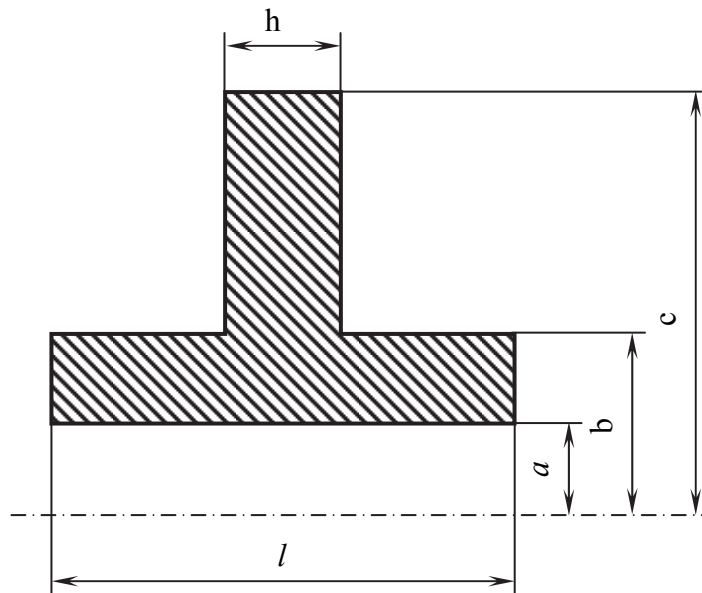


Рис. 2. Геометрическая форма детали диск со ступицей

нормальных напряжений в цилиндрических координатах [4]:

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2 (q - p)}{(b^2 - a^2) \cdot r^2} + \frac{a^2 p - b^2 q}{b^2 - a^2};$$

$$\sigma_\theta = -\frac{d^2 b^2 q}{(b^2 - a^2) \cdot r^2} + \frac{d^2 p - b^2 q}{b^2 - a^2}$$

где P, q – давление на внутренней и наружной поверхностях ступицы соответственно; r – текущий радиус.

Поскольку напряжения σ_r и σ_θ действуют на взаимоперпендикулярных площадках, суммарное напряжение будет равно их геометрической сумме:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2}.$$

При $p=0$ и $r=b$

$$\sigma_r = -q; \sigma_\theta = -q \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2}. \quad (1)$$

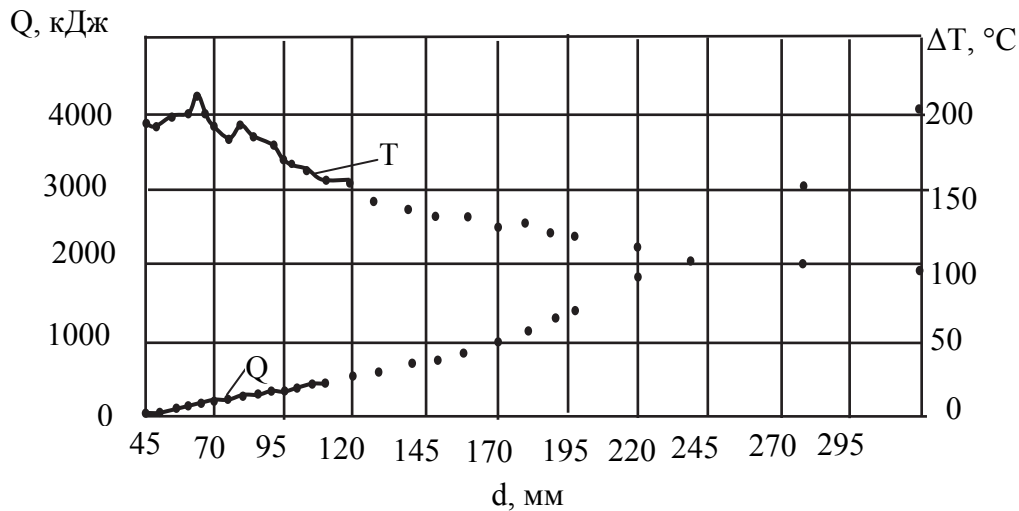


Рис. 1. Температура и тепловая энергия, необходимые для компенсации натяга при сборке или разборке

Радиальное перемещение поверхностей ступицы на наружном диаметре ($r=b$) при $p=0$:

$$u_{cm}^n = -\frac{(1+\nu)qb}{E(b^2 - a^2)} [a^2 + (1+2\nu)b^2], \quad (2)$$

на внутреннем диаметре ($r=b$):

$$u_{cm}^e = -\frac{2(1+\nu)^2 qab^2}{E(b^2 - a^2)}. \quad (3)$$

Радиальное перемещение диска на радиусе $r=b$ при отсутствии давления на наружной поверхности диска:

$$u_D = \frac{(1+\nu)qb}{E(c^2 - b^2)} [c^2 + (1+2\nu)b^2], \quad (4)$$

Из условия совместности деформаций диска и ступицы при перепаде температуры $\Delta T''$, компенсирующем натяг соединения, когда нагревается только ступица

$$b_\beta \Delta T'' = \left| u_{cm}^n \right|_{r=b} + \left| u_D \right|_{r=b}. \quad (5)$$

Подставляя в это уравнение выражения (2) и (4) получим:

$$\Delta T = \frac{(1+\nu)q}{\beta E} F_1, \quad (6)$$

где F_1 безразмерный коэффициент:

$$F_1 = \frac{c^2 + (1+2\nu)b^2}{c^2 - b^2} + \frac{d^2 + (1+2\nu)b^2}{b^2 - a^2}.$$

Из уравнения (5) следует, что

$$q = \frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1}. \quad (7)$$

Как видно из (5), когда нагреву подвергается только ступица колеса, давление q , возникающее на границе ступицы с диском, определяется перепадом температур между ними. Оно ограничивается допускаемыми напряжениями для материала.

Подставляя (7) в формулы (1) имеем:

$$\sigma_r = -q = -\frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1}, \quad (8)$$

$$G_\phi = -\frac{\Delta T'' \beta E (a^2 + b^2)}{(1+\nu) F_1 (b^2 - a^2)}. \quad (9)$$

Тогда суммарное напряжение:

$$\sigma_{(\Sigma)} = \frac{\Delta T'' \beta E}{(1+\nu) F_1} \sqrt{1 + \frac{(a^2 + b^2)}{(b^2 - a^2)^2}} \leq [\sigma]. \quad (10)$$

Допускаемый по условию прочности перепад температур при нагреве равен:

$$[\Delta T''] = \frac{[\sigma_{(\Sigma)}] (1+\nu) F_1}{\alpha E \sqrt{1 + \frac{(a^2 + b^2)}{(b^2 - a^2)^2}}}. \quad (11)$$

Из (3) и (7) имеем величину допускаемого, из условий прочности, перемещения U_{cm} внутренней поверхности ступицы для компенсации натяга соединения:

$$\left[U_{cm} \right]_{r=a} = -\frac{2(1+\nu) ab^2 [\Delta T''] \beta}{(b^2 - a^2) F_1}. \quad (12)$$

Если $U_{cm} \geq N$, то можно нагревать только ступицу детали.

Количество тепла, необходимого для ступицы:

$$Q'' = c m_c [\Delta T''] \quad (13)$$

где m_c – масса ступицы.

Зависимость между температурными перепадами при нагреве равномерно всей детали $\Delta T'$ и части $\Delta T''$, можно найти из условия обеспечения в обоих случаях одинакового радиального расширения отверстия в ступице U_{cm} :

$$\frac{2(1+\nu) ab^2 [\Delta T''] \beta}{(b^2 - a^2) F_1} = \beta a \Delta T'.$$

Тогда:

$$\Delta T' = [\Delta T''] \frac{2(1+\nu) b^2}{(b^2 - a^2) F_1}. \quad (14)$$

Отметим, что это уравнение справедливо при условии, что величина $[\Delta T'']$, допускаемая по критерию ограничения напряжения $\sigma_{(\Sigma)} \leq [\sigma]$, которое возникает в месте перехода горячей ступицы в холодный диск.

Сопоставление тепловых затрат при полном нагреве Q^1 и локальном нагреве только ступицы Q'' дает следующее соотношение:

$$Q^1 = Q'' \frac{(m_c + m_d)2(1+\nu)b^2}{m_c(b^2 - d^2)F_1}, \quad (15)$$

где m_d – масса диска; $Q^1 = c(m_c + m_d)\Delta T^1$.

Обозначив по аналогии с F_1 отношение $\frac{2(1+\nu)b^2}{(b^2 - a^2)F_1}$, как безразмерный коэффициент F_2 , имеем:

$$Q^1 = Q'' \frac{m_c + m_d}{m_c} F_2. \quad (16)$$

Для ориентировочной оценки величины теплотрат при двух вариантах нагрева геометрические параметры b и c удобно выразить в функции параметра a – радиуса отверстия в ступице. В качестве примера выберем зубчатое колесо, с типичными соотношениями размеров: $b = 2a$; $c = 2b = 4a$; длина ступицы $l = 1,6b = 3,2a$; толщина диска $h = 0,6a$. Тогда масса ступицы:

$$F_2 = \frac{2(1+\nu)4a^2}{(4a^2 - a^2)F_1} = 0,8$$

$$m_c = \nu l \pi (b^2 - a^2) = 9,6\pi \nu a^3,$$

а масса диска:

$$m_d = \nu h_d \pi (c^2 - b^2) = 7,2\pi \nu a^3.$$

Соотношение затрат тепла из (16)

$$\frac{Q^1}{Q''} = 0,8 \left(1 + \frac{7,2\pi \nu a^3}{9,6\pi \nu a^3} \right) = 1,4.$$

Здесь $F_2 = 0,8$ получено при значении коэффициента Пуассона для стали 0,3 при соответствующем значении $F_1 = 4,33$. Эта величина отношения тепловых затрат является завышенной, так как рассматриваемая схема нагрева колеса, когда нагревается только ступица в значительной мере является искусственной. В реальных условиях диск всегда нагревается, как минимум, вследствие теплопередачи. Однако эта цифра показывает предельную возможность экономии энергии сохранении целостности детали.

Для анализа влияния соотношений геометрических характеристик детали типа ступица с диском и неравномерности ее нагрева по радиусу, были выполнены расчеты по приведенным зависимостям и составлены таблицы. Расчеты выполнялись для одного и того же расширения посадочного отверстия детали.

Анализ показал, что:

– максимально экономится энергия при $h/l = 0,3 \div 0,2$, причем эта величина медленно уменьшается с уменьшением разности температур между ступицей и диском;

– затраты энергии существенно зависят от отношения c/b , уменьшаясь от величины 0,95 до 0,65 (при практически реализуемых значениях b/a от 1,3 до 2,0);

– отношение b/a влияет на затраты энергии незначительно. Тем не менее, максимальная экономия энергии достигается при $b/a = 1,5$ – наиболее широко используемой

геометрии детали в применяемых конструкциях. При меньших значениях b/a затраты энергии несколько возрастают, а при больших значениях практически не изменяется;

– экономия энергии, в зависимости от отношения температур ступицы и диска, для деталей характеризуемых значениями b/a и $c/b=1,8$, изменяется в пределах от 2% до 27%.

График (рис. 3) иллюстрирует сделанные выводы. Геометрические соотношения деталей здесь были следующими: $b/a = 1,5$; $c/b = 1,8$; $h/l = 0,3$. Температуры ступицы

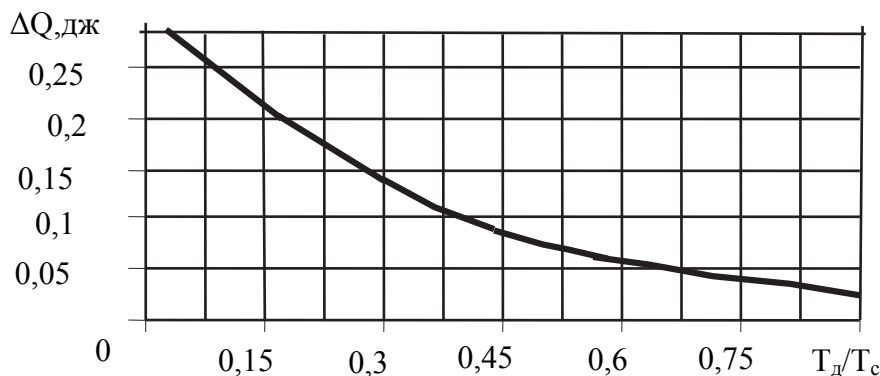


Рис. 3. Изменения величины экономии тепловой энергии ΔQ при различных отношениях температур нагрева диска T_d и ступицы T_c

и диска брались как средние.

Очевидно, что полученные величины значения ΔQ для деталей с другими геометрическими характеристиками будут отличаться от приведенных на графике, однако характер изменения не изменяется.

Поскольку создание ступенчатого распределения температур между ступицей и диском невозможно, полученные количественные оценки экономии энергии являются приблизительными, дающими возможность оценить рациональность использования локального нагрева при технологиях сборки и разборки соединений. Соответственно и возникающие при равномерном нагреве элементов охватываемой детали напряжения, так же будут оценочными. Для более точной и определенной оценки энергетических возможностей при неравномерном нагреве деталей сложной формы необходимо исследовать температурные поля во взаимосвязи с соответствующими им полями механических напряжений. Это позволит разработать рекомендации по наилучшему размещению источников нагрева относительно детали и, значит проектированию оптимальных индукционных нагревателей.

Выводы.

В целом, относительно сложных крупногабаритных деталей следует отметить, что: наилучшая конструкция с точки зрения нагрева та, которая имеет симметрично расположенную ступицу с плавными переходами в диск, а диски – в обод, тогда можно нагревать только часть, прилегающую к посадочной поверхности, что даст экономию тепловой энергии. При этом напряженно деформированное состояние материала можно иметь низкого уровня.

Литература

1. Андреев А.Г., Резниченко Н.К. Напряженно-деформированное состояние составных осесимметричных конструкций, собираемых с натягом при использовании нагрева. // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". -Харків: НТУ «ХПИ». -2005.-№47. -С. 3-8.

2. А.Г.Андреев, Н.К. Резниченко, О.В. Щепкин. Оптимизация нагрева при разборке деталей. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2006. - №32 – С. 3-8.

3. Андреев А.Г., Щепкин А.В. Оптимизация технологических нагревов бандажного колеса при сборке колесной пары тепловоза // *Інформація по 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» Вісник інженерної академії України, Київ, 2000.* – С. 415-418.

4. Арпентьев Б.М., Зенкин А.С., Куцын А.Н. *Механизация и автоматизация сборочных работ на машиностроительных предприятиях.* – К.: Техніка, 1994. – 232 с.

© М.К. Резніченко, О.М. Резніченко, Л.В. Ніколенко

УДК 621.921:621.923

М.К. Резніченко, д.т.н., проф.

О.М. Резніченко, к.п.н., доц.

Л.В. Ніколенко, інженер

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Наведено результати дослідження впливу конструкції виробу на ефективність індукційного нагріву.

Ключові слова: індукційний нагрів, стандартна посадка, натяг, технологічність, енергозбереження.

UDC 621.921:621.923

M. Reznichenko, Doctor of Science, Professor.

E. Reznichenko, c.p.s., docent.

L. Nikolenko, engineer

Ukrainian engineering pedagogics academy, Kharkov

RESEARCH INFLUENCE OF PRODUCT CONSTRUCTION ON THE EFFICIENCY OF INDUCTION HEATING

The results of studies of the effect of product construction on the efficiency of induction heating are given. It is shown that the use of local heating with the allowable thermal stresses occur, will significantly reduce thermal costs, increase energy efficiency of induction heating.

Keywords: induction heating, standard fit, tightness, manufacturability, energy saving.