

УДК 621.311

Выпанасенко Н.С.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОЩНОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПОСАДКОЙ С НАТЯГОМ

Предложена методика определения удельной поверхностной мощности индукционного нагрева соединений цилиндрических деталей.

Для получения неподвижных соединений цилиндрических деталей в машиностроении часто используют посадки с натягом. Такие конструкции просты в исполнении, а неподвижность деталей достигается благодаря механическим напряжениям, возникающим в материале вследствие деформации контактных поверхностей. Примером цилиндрических соединений деталей может служить посадка внутренних колец подшипников на вал, а также колец, выполняющих роль бандажей - фиксаторов положения других деталей, находящихся на валу. При отсутствии дополнительных креплений (шпонок, штифтов) посадку стремятся осуществить со значительной контактной поверхностью. Для исключения проскальзывания поверхности втулки по поверхности вала крутящий момент пытаются уменьшить. Это достигается тем, что внутренний и внешний диаметр втулки отличаются незначительно, то есть втулка выполняется тонкостенной.

В процессе ремонта изделий приходится выполнять демонтаж соединений с натягом. Распрессовка изделий осуществляется за счет осевых нагрузок и часто сопровождается повреждением насадочных поверхностей в виде образуемых на поверхности рисок, царапин, задиоров. После нескольких ремонтов вал приходит в негодность и подлежит списанию. Нагрев колец при распрессовке позволяет избежать неприятных явлений. В результате нагрева кольцо расширяется и его можно снять с вала без повреждений. Быстрый нагрев втулки можно обеспечить индукционным методом. При этом время демонтажа сокращается, что способствует высокой энергетической эффективности процесса. Важно, чтобы втулка и вал нагревались до разных температур, что позволит в результате различий в степени их температурного расширения ликвидировать натяг и создать зазор, необходимый для беспрепятственного съема втулки с вала.

Электромагнитные, тепловые, механические процессы, протекающие при демонтаже соединений, выполняемом индукционным методом, до конца не изучены. Это является причиной отсутствия простой методики расчета параметров процесса, использование которой в практике гарантировало бы осуществимость процесса демонтажа при минимальной мощности источника питания. Отсутствие методики часто приводит к неверному определению требуемой мощности источника. При заниженной мощности процесс не может быть реализован, а её существенное превышение над требуемым значением приводит к удорожанию сравнительно сложного электрооборудования, работающего, как правило, на повышенных частотах. Статья посвящена определению значения одного из важных параметров индукционного нагрева – удельной поверхностной мощности, которое обеспечит ликвидацию натяга и позволит выбрать источники питания требуемой мощности.

Постановка задачи следующая: необходимо определить удельную поверхностную мощность P_0 при равномерном распределении источников тепла в поверхностном слое втулки, обеспечивающую в стационарном тепловом режиме необходимую разность температур Δt между внутренней поверхностью втулки и наружной поверхностью вала. При этой разности температур обеспечивается ликвидация натяга посадки и создается зазор для беспрепятственного снятия втулки с вала. Достижение необходимой разности температур между поверхностями деталей в стационарном тепловом режиме позволит осуществить демонтаж при минимальном значении выходной мощности индукционной установки. Ясно, что вычисленное исходя из этих условий, значение удельной поверхностной мощности P_0 является граничным уровнем. Если в

* Национальный горный университет, бакалавр

процессе нагрева он не будет достигнут, то натяг не будет ликвидирован. Превышение вычисленного значения удельной мощности сопровождается ликвидацией натяга, однако выходная мощность источника питания при этом возрастает. Таким образом, в практике целесообразно реализовать режим с удельной поверхностной мощностью P , несколько превышающей вычисленное значение P_0 . Проанализируем возможности для расчета значения P_0 .

Будем рассматривать широко распространенные в машиностроении посадки стальных втулок на стальной вал. Обмотку индуктора располагают на наружной поверхности втулки. Такое расположение индуктора определено необходимостью быстрого нагрева втулки, что достигается концентрацией магнитного поля в этой области. Расположение индуктора на внешней поверхности втулки хорошо реализуемо конструктивно, так как индуктор представляет собой катушку, выполненную в виде соленоида. Индуктор может быть легко одет на втулку и снят с нее после выполнения операции демонтажа. В простейшем варианте рассматриваемая конструкция имеет вид, показанный на рис. 1.

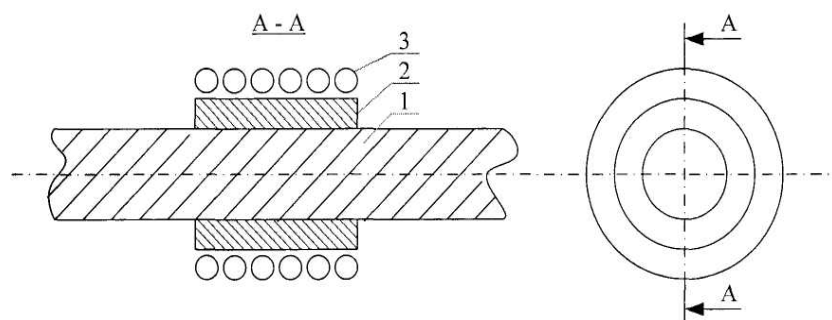


Рис. 1 – Система „индуктор - нагреваемое тело”: 1 - вал, 2 - втулка, 3 - обмотка индуктора

В практике машиностроения применяются близкие к приведенной на рис. 1 конструкции.

Для расчета значения P_0 необходимо определить Δt , удельные потери мощности с наружной q_1 , а также внутренней q_2 поверхностей втулки. Так как рассматривается тонкостенная втулка, то потерями из её боковой поверхности можно пренебречь. Тогда в стационарном тепловом режиме справедливо

$$P_0 = q_1 + q_2. \quad (1)$$

В [1] показано, что снятие втулки с вала станет возможным, если в процессе нагрева разность температур на поверхностях сопряженных деталей достигает значения:

$$\Delta t = \frac{N_\delta + S}{\alpha d}, \quad (2)$$

где N_δ - наибольший натяг соединения; S - зазор, необходимый для успешного демонтажа соединения; α - коэффициент линейного расширения материала; d - номинальный диаметр соединения.

Имеет смысл проанализировать наиболее распространенные посадки втулок на вал с точки зрения достигаемых значений натяга N_δ . Величина натяга зависит от номинального диаметра соединения d и вида посадки [2]. Значения N_δ для диаметров соединения от 1 до 500 мм приведены в табл. 1.

Ясно, что с увеличением диаметра соединения d , значение N_δ возрастает. Если ориентироваться на горячую посадку с наибольшим натягом (A / Gp) и считать, что зависимость между N_δ и d линейна, то получим приближенную формулу для вычисления N_δ в зависимости от d . С учетом значения N_δ , приведенного в табл. 1 для $d = 500$ мм, получаем

$$N_\delta \approx \frac{545 \cdot 10^{-3}}{500} d, \text{ (мм)}. \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) приобретает вид:

$$\Delta t = \frac{1,09 \cdot 10^{-3} \cdot d + S}{\alpha d}. \quad (4)$$

Таблица 1

Посадка	Область применения посадки	Наибольший натяг N_{δ} , мкм
$\frac{A}{Gr}$	Применяют при значительных крутящих моментах (несъемные муфты, бандажи железнодорожных колес, бурты на валах и т.п.)	27 – 545
$\frac{A}{Pr}$	Применяют в тех случаях, что и предыдущую посадку, но при меньших крутящих моментах	18 – 300
$\frac{A}{Pn}$	Применяют при сопряжении тонкостенных деталей, где посадка A/Pr не приемлема из-за недопустимо больших деформаций (уплотнительные кольца на валах и т.п.)	16 – 170

Если в процессе нагрева втулки разность температур на поверхности сопряжения достигнет значения, рассчитанного по формуле (4), то возникнет возможность съема кольца в случае любой из перечисленных в таблице 1 посадок. Это важный вывод, так как при демонтаже оборудования тип посадки может быть неизвестным. Значение S обычно составляет $0,01\sqrt{d}$ мм [3]. Поэтому выражение (4) позволяет рассчитать требуемую разность температур в зависимости от диаметра соединения d . Этот параметр может быть легко измерен непосредственно перед демонтажем.

Исходя из начальной постановки задачи, ориентированной на исследование соединений стальных изделий, можно ожидать, что значения температурных коэффициентов линейного расширения α будут отличаться в разных сопряжениях незначительно. Для углеродистых сталей в диапазоне температур от 20 °С до 200 °С среднее значение α составляет $\alpha = (11,89 \div 12,66) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, легированных – $\alpha = (11,2 \div 17,5) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ [4].

С учетом изложенного получим семейство расчетных зависимостей $\Delta t(d)$ при разных значениях α (рис. 2).

Видно, что с увеличением диаметра соединения d для успешного демонтажа втулки необходимо обеспечивать меньшее значение разности температур Δt на поверхности сопряженных деталей.

Обратимся к анализу удельных потерь мощности с поверхности втулки. Потери мощности q_1 пропорциональны разности температур наружной поверхности втулки и окружающей среды (воздуха) t_c , то есть

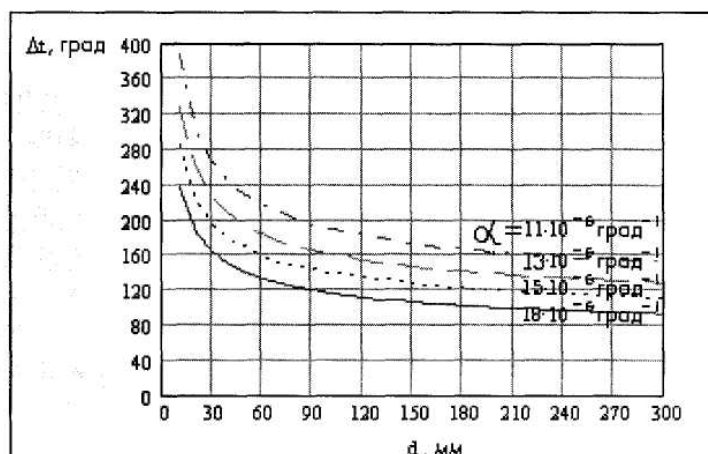
$$q_1 = \alpha_1(t_H - t_c), \quad (5)$$

где t_H – температура наружной поверхности втулки.

Удельные потери мощности q_2

$$q_2 = \alpha_2(t_B - t_c), \quad (6)$$

где t_B – температура внутренней поверхности втулки.

Рис. 2 – Семейство расчетных зависимостей $\Delta t(d)$ при разных значениях α

Здесь сделано допущение о том, что температура поверхности вала в процессе нагрева не изменяется и равна температуре окружающей среды. Правомерность такого допущения обоснована тем, что в таких соединениях вал, как правило, имеет большую массу и большую площадь соприкосновения с воздушной средой. Для условий стационарного теплового режима, соответствующего моменту ликвидации натяга и определяющего значения удельной поверхностной мощности P_0 , уравнение (6) примет вид:

$$q_2 = \alpha_2 \Delta t. \quad (7)$$

Таким образом, становится понятным, что расчет P_0 в соответствии с (1) требует определения коэффициентов пропорциональности α_1 и α_2 . Коэффициенты могут быть представлены математическими зависимостями, учитывающими конкретные условия контакта втулки и внешней средой. Однако в рассматриваемой технологии эти условия неоднозначны. Заранее предугадать возможные конструктивные особенности исполнения индуктора, его теплоизоляцию, а также существующей характер посадки втулки на вал сложно. В то же время, влияние коэффициентов α_1 и α_2 на значения q_1 и q_2 (а, следовательно, и P_0) существенно. Таким образом, математическое моделирование тепловых процессов затруднено. В этой ситуации представляется обоснованным проведение эксперимента, позволяющего для условий конкретной посадки определить значение α_1 и α_2 , то есть речь идет об идентификации этих параметров. Как правило, операция демонтажа соединения не является разовой. В ремонтных мастерских предприятий четко определены узлы, с демонтажем которых приходится сталкиваться. Поэтому, идентификацию параметров α_1 и α_2 необходимо осуществлять для существующего в мастерской перечня демонтируемых узлов. Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований по идентификации параметров будут неоднократно использованы при проведении однотипных технологических операций демонтажа соединений. Важно то, что при проведении эксперимента точность определения α_1 и α_2 высокая. Это существенно повышает точность последующего расчета значения P_0 и, следовательно, определения условий для успешного демонтажа деталей.

Необходимость проведения разового эксперимента по идентификации параметров объекта, подлежащего нагреву, несколько усложняет задачу расчета P_0 и выбора на этой основе требуемого источника питания. Поэтому необходимо стремиться упростить условия проведения эксперимента, исключить необходимость использования сложного оборудования, имеющего большую стоимость. Для этой цели можно применить метод экспериментальных исследований, описанный в [5]. Суть метода состоит в том, что с помощью обмотки, выполненной из тонкого медного провода и уложенной на поверхности втулки под обмоткой индуктора, измеряют значение напряженности электрического поля на поверхности втулки E_e . Это позволяет расчетным путем определить действующее значение напряженности магнитного поля H_e , а также относительную магнитную проницаемость стали на поверхности втулки μ_e . Связь между указанными параметрами выражается зависимостями [6]:

$$\frac{E_e}{H_e} = \sqrt{2} \cdot \frac{\rho}{\Delta_e} \cdot f_1(n); \quad (8)$$

$$\mu_e = 8130 \cdot (H_e \cdot 10^2)^{-0,894}, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление стали в условиях проведения эксперимента; $\Delta_e = 503 \sqrt{\rho / (\mu_e f)}$; f – частота тока индуктора; $f_1(n) = \sqrt[4]{2n / (n + 1)}$.

Для углеродистых сталей $n = 9,4$ [6]. Формулы дают удовлетворительные результаты расчета при $H_e > 40$ А/см, то есть создаваемое при проведении эксперимента поле должно соответствовать этому требованию. Наиболее простым вариантом, существенно упрощающим эксперимент, является подключение индуктора к источнику синусоидального напряжения частотой 50 Гц (трансформатору). Использование тока промышленной частоты исключает процедуру преобразования частоты тока и упрощает условие проведения эксперимента. При известных μ_e , H_e для расчета удельной мощности P_0 , воспользуемся формулой [6]

$$P_0 = 0,993 \cdot 10^{-3} H_{me} \sqrt{\rho \mu_e \cdot f} \cdot f_2(n) \cdot F(m), \quad (10)$$

где $H_{me} = \sqrt{2} H_e$ – амплитудное значение напряженности магнитного поля, $f_2(n) = 4n / \sqrt[4]{8n(3n+1)^2(n+1)}$.

Расчет функции $F(m)$, определяющей форму нагреваемой поверхности (цилиндрическую), осуществляется по графической зависимости, приведенной в [7]. Для этого предварительно рассчитывают значения

$$\xi = \frac{\Delta_e}{f_2(n)}; \quad (11)$$

$$m = \sqrt{2} \frac{R_1}{\xi}, \quad (12)$$

где R_1 – наружный радиус втулки.

Расчет значения P_0 , исходя из полученного в результате проведения эксперимента значения P_0 , возможен в том случае, если известны температурные режимы процесса нагрева. На рис. 3 в качестве иллюстрации характера изменения температуры t° приведены ее зависимости от радиуса рассматриваемого соединения деталей R . На рисунке показано также сечение рассматриваемого соединения. Здесь R_2 – радиус вала. Все параметры, относящиеся к нагреву в условиях проводимого эксперимента, обозначим индексом «штрих», например t', P_0', q' . Рис. 3, а иллюстрирует режимы, характерные для условий проведения эксперимента, а рис. 3, б – для условий, связанных с ликвидацией натяга.

Вследствие равенства тепловых потоков на границе сопряжения втулки и вала можно записать:

$$q_2' = \alpha_2 (t_6' - t_c') = \frac{(t_H' - t_6') \lambda_{cm}}{R_1 - R_2}, \quad (13)$$

где λ_{cm} – коэффициент теплопроводности стали.

Измерив значения температур t_H', t_6', t_c' в стационарном режиме нагрева, осуществляемом в процессе проведения эксперимента, и воспользовавшись зависимостью (13) получим значение α_2 . Регистрацию температур на внутренней и внешней поверхности втулки целесообразно осуществлять бесконтактным способом, определяя точки для измерения на боковой стенке втулки.

При известных значениях P_0' и q_2' из формулы (1) можно определить q_1' . Это позволит, воспользовавшись зависимостью (5), определить значение α_1 .

Следует подчеркнуть, что мощность установки для проведения эксперимента может быть небольшой. Достигаемая в процессе нагрева температура может быть меньшей значения, необходимого для ликвидации натяга. Важно зафиксировать разность температур в рассматриваемых точках, и воспользовавшись аналитическими зависимостями, определить значения α_1 и α_2 .

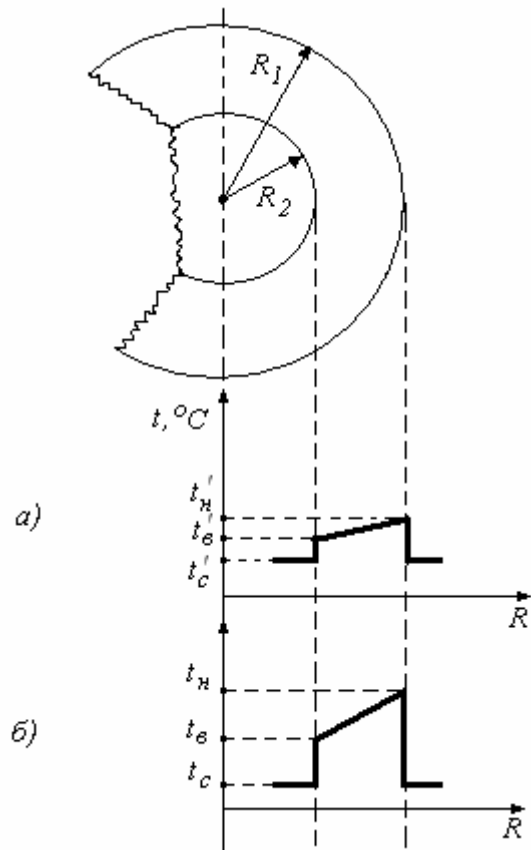


Рис. 3 – Характер распределения температуры в стационарном режиме нагрева соединения

Перейдем к режиму ликвидации натяга. Будем считать, что в процессе нагрева соединения индукционной установкой условия теплообмена с внешней средой не изменяются и эквивалентны условиям, сложившимся при предварительном проведении эксперимента, то есть α_1 и α_2 не изменяются и равны значениям, ранее полученным из эксперимента. Разность температур Δt , необходимая для ликвидации натяга известна. Зависимость (7) позволяет рассчитать значение q_2 , соответствующее рассматриваемому режиму. Температуру наружной поверхности втулки t_n с учетом зависимости $t_B = \Delta t + t_c$ получим из формулы

$$q_2 = \frac{[t_H - (\Delta t + t_c)]\lambda_{cm}}{R_1 - R_2}. \quad (14)$$

Расчет t_n позволит определить значение q_1 и рассчитать P_0 по формуле (1). При одинаковых значениях удельной поверхностной мощности во всех локальных областях нагреваемой втулки суммарная мощность, вводимая в нагреваемую деталь, может быть рассчитана по формуле:

$$P = SP_0, \quad (15)$$

где S - площадь поверхности втулки.

Следует учесть тот факт, что значение P_0 существенно зависит от температуры окружающей среды. Поэтому при расчете P_0 необходимо ориентироваться на минимальное значение t_c , которое может возникнуть при демонтаже соединения.

Выводы

- Сформулированы условия нагрева, приводящие к демонтажу соединения деталей. Определен требуемый уровень удельной поверхностной мощности, обеспечивающий ликвидацию натяга посадки.

- Получены аналитические зависимости для расчета удельной поверхностной мощности нагрева исходя из результатов идентификации параметров и существующих условий протекания тепловых, электромагнитных и механических процессов в рассматриваемой системе.

Перечень ссылок

1. *Шатько И.И.* Индукционный нагрев при сборке и разборке колесных пар: Тепловая сборка в машиностроении / *И.И. Шатько*. – Техника, 1968. – С. 9-23.
2. *Мягков В.Д.* Допуски и посадки / *В.Д. Мягков*. – М.: Машиностроение, 1966. – 550 с.
3. *Берникер Е.И.* Посадки с натягом в машиностроении / *Е.И. Берникер* – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 340 с.
4. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
5. *Немков В.С.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева / *В.С. Немков, В.Б. Демидович*. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1988. – 280 с.
6. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов / *А.Е.Слухоцкий, В.С.Немков, Н.А.Павлов, А.В.Бамуэр* // Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
7. *Кувалдин А.Б.* Индукционный нагрев ферромагнитной стали / *А.Б. Кувалдин*. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

Рецензент: Ю.Т. Разумный,
д-р техн. наук, проф., НГУ

Статья поступила 12.03.2008