



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 621.365.5

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>

EDN: <https://elibrary.ru/hyqfmu>



## Особенности использования индукционного нагрева цилиндрических деталей, сопряженных с осью

В. И. Дудин✉, С. А. Лелехов, А. Н. Фещуков

Научно-производственная компания «ТомИндуктор»,  
Москва, Томск, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящей статье предметом изучения является температура разъединения цилиндрической детали от оси и ее зависимость от величины натяга и мощности индукционного нагрева на основе результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования данного вопроса.

**Материалы и методы.** С помощью расчетов определена температура внешней поверхности цилиндрической детали, при которой натяг принимает нулевое значение и деталь снимается без усилия. Авторами численно решены уравнения теплопроводности и деформации и определены указанные значения температуры разъединения. Кроме того, рассчитан температурный профиль по сечению цилиндрической детали.

**Результаты.** Выявлена зависимость температуры разъединения цилиндрической детали — внутреннего кольца подшипника от мощности индукционного нагревателя. Учтены зависимости коэффициента температуропроводности от температуры. Рассмотрены особенности посадки цилиндрических деталей на оси и валы.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что зависимость температуры разъединения цилиндрической детали — внутреннего кольца подшипника от мощности имеет две области: для относительно малых значений (до 5–6 кВт) температура разъединения практически постоянна, а для более высоких значений, более 6 кВт, температура разъединения пропорциональна мощности. При этом необходимо, чтобы в конструкции индукционных нагревателей была предусмотрена возможность контроля мощности индукционного нагрева и времени нагрева. Это позволит на техническом уровне запретить выполнение операций с выходом параметров за пределы регламента. Результаты работы могут быть применены к широкому кругу сопряженных с осью деталей, например для бандажей станов холодного волочения труб, бандажей центров колесных пар локомотивов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** буксовый подшипник, индукционный нагрев, цилиндрические детали, натяг, температура разъединения, температурный профиль, температуропроводность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Дудин В. И., Лелехов С. А., Фещуков А. Н. Особенности использования индукционного нагрева цилиндрических деталей, сопряженных с осью // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 257–264. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>.

✉ vladimir.dudin@gmail.com (В. И. Дудин)

© Дудин В. И., Лелехов С. А., Фещуков А. Н., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.365.5

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>

EDN: <https://elibrary.ru/hyqfmu>



## Features of induction heating of cylindrical parts conjugated with an axis

Vladimir I. Dudin✉, Sergey A. Lelekhov, Alexey N. Feshchukov

TomInduktor Research and Production Company,  
Moscow, Tomsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** This article examines the temperature of separation of a cylindrical part from the axis and its dependence on the interference and induction heating power based on theoretical calculations and experiments.

**Materials and methods.** The calculations show the temperature of the outer surface of a cylindrical part, where the interference vanishes and the part comes off without force. The authors numerically solved the heat conduction and deformation equations and determined these separation temperatures. The researchers also calculated the temperature profile over the cross-section of a cylindrical part.

**Results.** The authors identified the dependence of the separation temperature of a cylindrical part (the inner ring of a bearing) on the power of the induction heater. The article considers the dependence of the thermal diffusivity coefficient on temperature and examined the features of fitting cylindrical parts on axes and shafts.

**Discussion and conclusion.** The research shows that the dependence of the separation temperature of a cylindrical part (the inner ring of a bearing) on power has two regions: the separation temperature is almost constant for relatively small values (up to 5–6 kW); and the separation temperature is proportional to the power for higher values, above 6 kW. In this case, the induction heater requires a controller for induction heating power and heating time. This would technically prohibit operations with parameters outside the test procedure. The research results are applicable to a wide range of axis associated parts, for example, for bands of cold pipe drawing mills, bands for the centres of locomotive wheel pairs.

**KEYWORDS:** journal bearing, induction heating, cylindrical parts, interference fit, separation temperature, temperature profile, thermal diffusivity

**FOR CITATION:** Dudin V. I., Lelekhov S. A., Feshukov A. N. Features of induction heating of cylindrical parts conjugated with an axis. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):257-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>.

✉ [vladimir.dudin@gmail.com](mailto:vladimir.dudin@gmail.com) (V. I. Dudin)

© Dudin V. I., Lelekhov S. A., Feshukov A. N., 2023

**Введение.** Техническое использование индукционного нагрева началось еще в довоенные годы и связано с фамилией В. П. Вологодина [1]. Наиболее полное отражение технических возможностей индукционного нагрева представлено в работе М. Г. Лозинского [2], который подвел итог многолетним работам по использованию индукционного нагрева. Надо отметить, что основные направления в использовании индукционного нагрева касались решения проблем поверхностной заковки материалов, готовых изделий, а также задач, связанных с конструированием индукционных нагревателей и индукторов [3–5]. В середине 50-х гг. прошлого столетия силами Проектно-конструкторского бюро Главного управления локомотивного хозяйства Министерства путей сообщения СССР (ПКБ ЦТ) были внедрены индукционные нагреватели серии «ПР» для широкого использования при съеме различных цилиндрических деталей с осей и валов. Поскольку данные нагреватели работали на промышленной частоте, то для «подачи» переменного электромагнитного поля для нагрева нужной детали широко использовали промежуточные намагниченные кольца. Указанные нагреватели в системе ОАО «РЖД» в начале 2000-х гг. были полностью вытеснены высокочастотными индукционными нагревателями. Было ясно, что в силу воздействия замкнутых вихревых токов приповерхностный слой нагревается [6, с. 291–293] и, расширяясь, «тянет» за собой всю деталь. Конкретные параметры расширения и деформации деталей при нагреве выявлялись опытным путем. Ориентировочные данные о мощности закладывались в конструкции высокочастотных нагревателей, разумеется, с запасом. В результате конструкция современных нагревателей слабо связана с физическими процессами, протекающими в нагреваемой детали. Эту ситуацию можно сравнить с тем, как в начале XX в. конструкция двигателя слабо зависела от скорости и пробега автомобиля, связи скорости и радиусов поворота и т. д. Работ по индукционному нагреву существует достаточно много, но нет ни одной, в которой была бы исследована связь процессов, протекающих в теле нагреваемой детали, с мощностью нагрева, натягом, временем нагрева и т. д. Цель настоящей работы — исследовать процессы, протекающие при индукционном нагреве в металле, и определить, как они связаны с внешними параметрами, а именно: мощностью нагрева, натягом между деталью и осью, временем нагрева, частотой электромагнитного поля.

**Материалы и методы.** Расчеты были выполнены численными методами на основе простой модели: цилиндр, сопряженный натягом величиной  $d$  с осью. Внешний радиус цилиндра  $R_0$ , внутренний  $r_0$ , высота  $h$ . Электромагнитное поле частоты  $\omega$  создает однослойный

индуктор, витки которого расположены вдоль высоты. Расчетная схема представлена на рис. 1 [7].

Совместное решение уравнений теплопроводности и смещений [8, с. 50; 9] имеет вид

$$\frac{dT(r,t)}{dt} = (\lambda / c\gamma) \left( \frac{d^2 T(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{dT(r,t)}{dr} \right) + Q(r,t) \right); \quad (1)$$

$$\frac{d^2 u(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{du(r,t)}{dr} \right) - u/r = (\mu + 1) \alpha \left( \frac{dT(r,t)}{dr} \right), \quad (2)$$

где  $T(r,t)$  — профиль температуры по сечению кольца;  $u(r,t)$  — соответствующее распределение смещений;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/кг·К;  $\gamma$  — плотность материала кольца, кг/м³;  $Q(r,t)$  — тепловыделение от внутреннего источника, связанного с индукционными токами;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha$  — температурный коэффициент расширения, 1/К. При численном решении уравнений (1), (2) использовали следующие приближения.

1. Перенос тепла вдоль оси считали не существенным для результатов, т. е. тепловое излучение в окружающую среду не учитывали. В этих приближениях можно было использовать одномерную геометрию, т. е. температура и смещения зависели от одной компоненты — радиуса  $r$ .

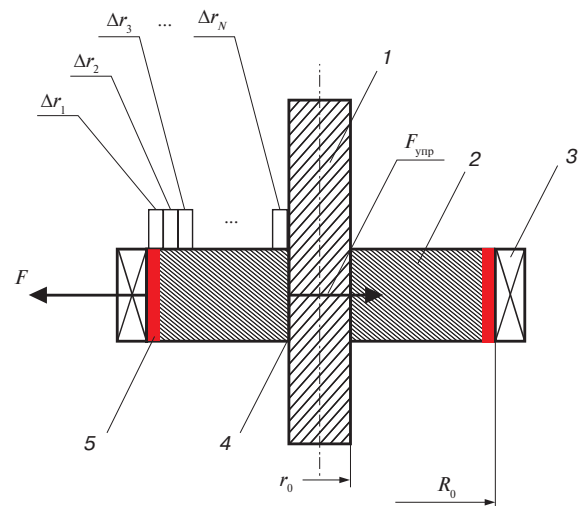


Рис. 1. Расчетная схема для определения процессов, происходящих в нагреваемой детали: 1 — ось; 2 — кольцо; 3 — индуктор; 4 — контакт сопрягаемых тел и температурное сопротивление контакта TRC; 5 — скин-слой;  $\Delta r_1 \dots \Delta r_N$  — условные кольцевые слои;  $F_{\text{упр}}$  — сила упругости

Fig. 1. Calculation scheme for determining the processes in the heated part: 1 — axis; 2 — ring; 3 — inductor; 4 — contact of mating bodies and temperature resistance of TRC contact; 5 — skin layer;  $\Delta r_1 \dots \Delta r_N$  — conventional ring layers;  $F_{\text{упр}}$  — elastic force

2. Все указанные характеристики материала при расчетах зависели от температуры, равно как и магнитная проницаемость — от индукции магнитного поля. Справочные данные вносились в приложения программы компьютерных расчетов. Данные о значениях констант и их температурной зависимости от индукции магнитного поля брали из общедоступных источников [2, 10].

3. Использовалось приближение Штейнметца [11], которое заключается в том, что тепловыделения вследствие протекания индукционных токов равны тем, которые вызывались бы постоянным током с амплитудой  $I_0 = j_0 sh$ , текущим в скин-слое. Здесь  $j_0$  — плотность индукционного тока при  $r = R_0$ ,  $s$  — величина (глубина) скин-слоя,  $h$  — высота кольца (цилиндра). Это дает возможность определить источник тепловыделений  $Q(r, t)$ , что упрощает процедуру численного интегрирования уравнений теплопроводности и смещений. Кроме того, этот подход определяет структуру разбиений сечения на  $N$  отрезков для численного решения, причем  $(R_0 - r_0) / N$  больше величины скин-слоя. Величина скин-слоя рассмотренных сталеи в диапазоне электромагнитных частот 3–10 кГц изменяется в пределах 0,36–0,66 мм. Так, для кольца толщиной 14 мм при разбиении получали 10 слоев. Начальное условие для всех слоев  $T_i = T_0 = 20^\circ\text{C}$  (293 К).

4. В приграничном слое, где соприкасаются кольцо и ось, учитывали тепловое сопротивление контакта (коэффициент TRC), связанное с натягом.

Определяли температуру внешней поверхности кольца, при которой натяг принимал нулевое значение. Эту температуру называли температурой разъединения  $T_p$ . Помимо теоретического интереса следует отметить, что практически эту температуру легко контролировать опытным путем. Проверка модели расчета [7] показала, что она дает обоснованные ответы на вопросы: как время съема (здесь и далее — это время от начала нагрева до момента разъединения кольца и оси) зависит от мощности  $P$  индукционного нагрева; как время съема зависит от тока индуктора, а значит, от мощности индукционного нагрева; как изменяется во время нагрева контактное давление между цилиндром и осью; как изменяется температура внутренней поверхности цилиндра и т. д.

Следует отметить, что в работе представлены в основном результаты расчетно-теоретического исследования. Связано это с тем, что в настоящее время не выпускаются индукционные нагреватели с возможностью регистрации мощности, поэтому для такой регистрации необходимо дополнительное оборудование. Также напомним, что нами использованы общедоступные данные по значениям материальных показателей [2, 10].

Ранее было отмечено, что использование индукционного нагрева имеет широкое распространение.

В этой связи следует отметить работу [12], где исследуется вопрос о нагреве индукционными методами стрелочных переводов в зимний период. Работа стрелок непосредственно связана с безопасностью движения транспортных средств на железных дорогах. Не менее важным является состояние внутренних колец подшипников ступиц колесных пар и опорных узлов локомотивов и вагонов, которые снимаются для обследования и контроля их состояния. Съем и последующую посадку внутренних колец подшипников в железнодорожной отрасли России проводят посредством индукционных нагревателей. Представленные материалы напрямую связаны с этими операциями.

**Результаты исследования.** В качестве предмета расчетов было взято исследование зависимости температуры разъединения кольца и оси от мощности индукционного нагрева  $T_p(P)$ . Эта зависимость определяется распределением температуры по сечению кольца, т. е. физическими процессами, происходящими в кольце. Мощность тепловыделения в кольце также зависит от частоты переменного тока индуктора  $\omega$ , т. е. температура разъединения может зависеть от частоты. Изменять мощность индукционного нагрева можно с помощью изменения тока индуктора, однако в настоящее время не существует высокоточных индукционных нагревателей, в которых можно произвольно менять частоту переменного тока индуктора.

Значительный практический интерес имеется к определению зависимости мощности индукционного нагрева, при которой кольцо снимается без натяга ( $d = 0$ ), от величины натяга.

Следует также отметить следующее обстоятельство. Работа  $A$ , совершаемая против упругой силы  $F_{\text{упр}}$  при снятии натяга величиной  $d$ , определяется из уравнения

$$A = Pt = \text{const}, \quad (3),$$

где  $t$  — время нагрева для данной величины натяга. Время нагрева для данного натяга обратно пропорционально мощности [6].

Формальный параметр  $T_p$  — температура внешней поверхности кольца, при которой натяг  $d = 0$ , и зависимость мощности индукционного нагрева от натяга  $P(d)$  определяются физическими процессами, происходящими в кольце при нагреве. Следовательно, мы рассчитывали зависимость температуры в сечении кольца от радиуса, т. е. температурный профиль в момент достижения состояния с  $d = 0$ .

На рис. 2 представлены зависимости температуры  $T_p$  кольца №42726 (буксовый подшипник вагона электропоезда, диаметр шейки оси колесной пары 130 мм) от мощности индукционного нагрева для величин натяга  $d = 30, 40, 50$  мкм,  $\omega = 5$  кГц. Характерной чертой всех кривых является наличие области, где температура разъединения кольца с осью слабо зависит

от мощности нагрева, и области, где температура разъединения пропорциональна мощности нагрева. Очевидно, что температура разъединения носит пороговый характер, т. е. при значениях мощности меньше пороговой разъединения деталей не происходит. Стоит отметить, что область независимости (или слабой зависимости) температуры разъединения деталей от мощности индукционного нагрева с ростом величины натяга уменьшается, а для натяга 50 мкм, скорее всего, этой области не существует.

На рис. 3 представлен график зависимости мощности от величины натяга, при которой происходит разъединение деталей. Этот график построен по данным, представленным на рис. 2. Данные по координате мощности являются пороговыми величинами, при которых происходит разъединение деталей. Расчетные точки графика (кривая 1) зависимости мощности нагрева от величины натяга описываются параболической кривой. Для втулки уплотнения тягового электродвигателя 1ДТ.003.3 была получена зависимость из расчетов, отображенных кривой 2. Для величины натяга 50 мкм квадратичная зависимость не выполняется. Можно констатировать, что для относительно малых мощностей индукционного нагрева, соотносящихся с малыми величинам натяга, имеет место параболическая зависимость температуры разъединения от мощности индукционного нагрева. Для высоких значений мощности и значений натяга указанная зависимость не выполняется.

В расчетах для зависимостей на рис. 4 мощность изменяли с помощью тока индуктора. Но мощность, выделяемая в кольце, при индукционном нагреве зависит также от частоты этого тока [13, с. 34],  $P \approx \sqrt{\omega}$ . Была рассчитана зависимость температуры разъединения внутреннего кольца буксового подшипника № 42736 и шейки оси при  $d = 30$  мкм,  $\omega = 10$  кГц. Видно, что температура разъединения пропорциональна мощности индукционного нагрева, а области независимости температуры разъединения от мощности не существует.

Чтобы объяснить указанные закономерности, рассчитаны зависимости распределения температуры по сечению кольца для двух выше обозначенных областей — со слабой и относительно высокой мощностью индукционного нагрева. Первая область соответствует слабой зависимости температуры разъединения от мощности нагрева, вторая — пропорциональной зависимости температуры разъединения от мощности нагрева.

На рис. 5 представлен график распределения температуры по сечению кольца № 42726 в момент его разъединения с осью: линия T1 соответствует области слабой зависимости температуры разъединения от мощности, а линия T2 относится к области, в которой температура разъединения растет с ростом

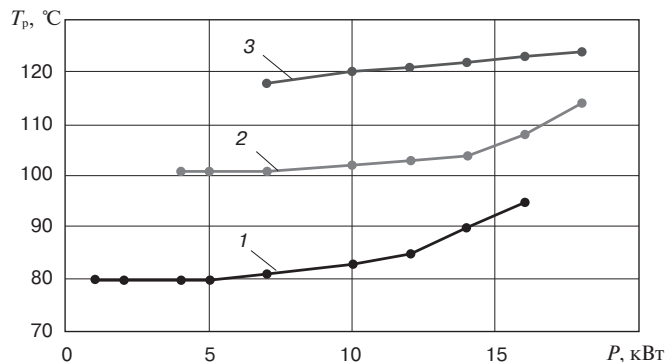


Рис. 2. Зависимость температуры разъединения кольца № 42726 от мощности индукционного нагрева для величины натяга: 1 — 30 мкм; 2 — 40 мкм; 3 — 50 мкм. Частота электромагнитного поля  $\omega = 5$  кГц

Fig. 2. Dependence of the temperature of separation the ring No. 42726 on the power of induction heating for the amount of interference: 1 — 30  $\mu\text{m}$ ; 2 — 40  $\mu\text{m}$ ; 3 — 50  $\mu\text{m}$ . Electromagnetic field frequency  $\omega = 5$  kHz

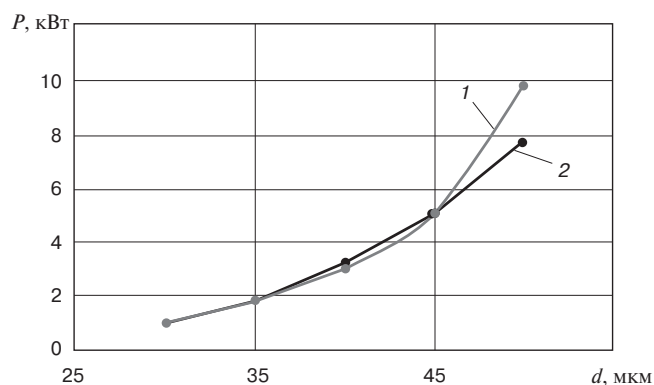


Рис. 3. Зависимость мощности разъединения кольца и оси от величины натяга:

1 — расчет по квадратичной зависимости,  $\omega = 5$  кГц; 2 — по данным рис. 2 (кривая 2)

Fig. 3. Dependence of the separation power of the ring and the axis on the interference: 1 — calculation using quadratic dependence,  $\omega = 5$  kHz; 2 — based on fig. 2 data (curve 2)

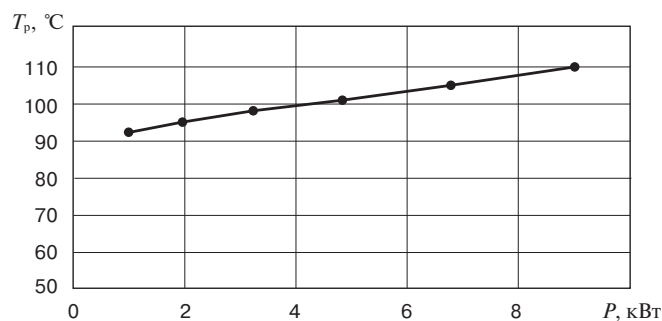


Рис. 4. Зависимость  $T_p(P)$  для внутреннего кольца подшипника № 42736, натяг 30 мкм,  $\omega = 10$  кГц

Fig. 4. Dependence  $T_p(P)$  for the inner ring of the bearing No. 42736, interference 30  $\mu\text{m}$ ,  $\omega = 10$  kHz

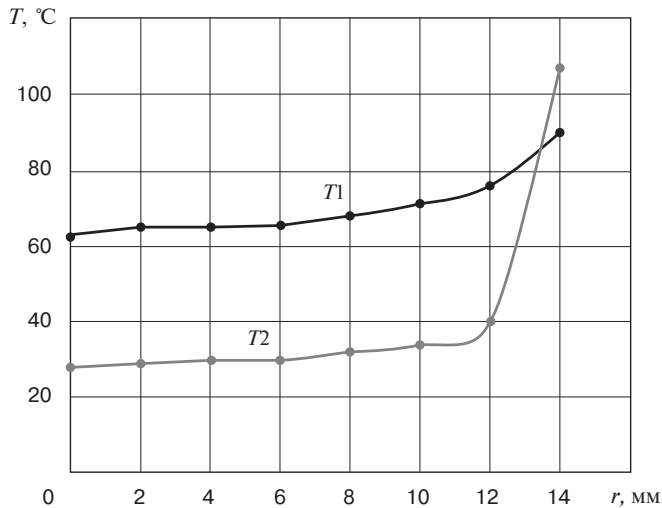


Рис. 5. Распределение температуры по сечению кольца № 42726,  $d = 40$  мкм:

$T_1$  — линия для диапазона температур, в котором температура разъединения кольца и оси не зависит от мощности (рассчитано для мощности 2 кВт);  $T_2$  — линия для диапазона температур разъединения кольца и оси, в котором температура разъединения пропорциональна мощности (рассчитано для мощности 10 кВт)

Fig. 5. Temperature distribution over the cross section of the ring No. 42726,  $d = 40$   $\mu\text{m}$ :

$T_1$  — line for a temperature range in which the ring and axis separation temperature does not depend on power (calculated for a power of 2 kW);  $T_2$  — line for a temperature range of the ring and axis separation in which the separation temperature is proportional to power (calculated for a power of 10 kW).

мощности. В данном случае речь идет о кольце с натягом 40 мкм,  $\omega = 5$  кГц.

Наблюдается отличие распределения температурных зависимостей по сечению кольца. Можно предположить, что для  $T_1$  кольцо расширяется постепенно как целое, и такой сьем можно определить как термомеханический. Авторы неоднократно наблюдали, как в некоторых случаях, когда кольцо не снималось, газосварщик устанавливал мощную длинную струю ацетиленового пламени и плавными движениями грел по кругу кольцо, после этого кольцо снималось без усилий. В области, где температура  $T_p$  зависит от мощности, ось при снятии кольца нагревается слабо: в момент разъединения ось имеет температуру 27 °С, а начальная температура оси — 20 °С.

Такое поведение  $T(r)$ , скорее всего, связано с зависимостью параметра температуропроводности  $a = \lambda / (c\gamma)$  от температуры, этот параметр определен уравнением (1). Также следует иметь в виду зависимость от температуры модуля Юнга  $E$ . В наших

расчетах принципиально учитывались температурные зависимости указанных выше параметров.

Известно [14, 15], что оба параметра уменьшаются с ростом температуры. Для сталей эта зависимость начинает проявляться при температуре 80 °С и выше. При более низких значениях указанные параметры практически не зависят от температуры, что ведет к независимости температуры разъединения от мощности. Когда температура приближается к 100 °С, уменьшение параметра  $a$  приводит к затруднению изменения температуры по сечению кольца, в то время как температура на поверхности растет. При сравнении температурных профилей по сечению кольца от 0 до 14 мм (рис. 5) видно, что для  $T_1$  профиль сосредоточен в диапазоне 63–66 °С, для  $T_2$  — в диапазоне 28–32 °С, начальная температура при расчетах 20 °С. Можно сказать, что для кольца с профилем  $T_2$  температура во внутренней части кольца «замораживается», т. е. на внешней поверхности кольца она возрастает быстрее: скорость роста температуры более чем в четыре раза превышает скорость изменения температуры во внутреннем объеме кольца. Рост температуры в приповерхностном слое способствует быстрому «растягиванию» приповерхностного слоя кольца, что приводит к снятию натяга ( $d = 0$ ).

**Обсуждение.** Для объяснения параболической зависимости мощности, при которой натяг зануляется ( $d = 0$ ), от величины натяга используем закон Гука для оценочных вычислений [16, с. 34]. Для этой области, где термофизические характеристики почти не меняются с температурой, указанный закон можно применить. При относительно медленном нагревании кольцо нагревается и расширяется, происходит работа против упругой силы  $F = kr$ , где  $k$  — коэффициент упругости,  $r$  — координата по радиусу кольца. Работа  $A$  по снятию натяга определяется интегралом

$$A = \int_0^d k r dr. \quad (4)$$

Интеграл определяем в пределах от 0 до  $d$ , т. е. до состояния, когда натяг «снимается». После интегрирования получим

$$A = k d^2 / 2. \quad (5)$$

Теперь из (3) и (5) вытекает  $P \sim d^2$ , что подтверждают данные рис. 3. Исключение касается относительно больших значений натяга, где работает другой механизм разъединения кольца с осью. Это требует дополнительных исследований.

<sup>1</sup> Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту узлов с подшипниками качения локомотивов и моторвагонного подвижного состава [Электронный ресурс]: утв. МПС РФ от 11.06.1995 № ЦТ-330. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200080497> (дата обращения: 10.01.2023); Электрические машины электропоездов. Общее руководство по ремонту. 104.03.00672-2009 КО: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2009 № 2731р. Екатеринбург: УралЮрИздат, 2013. 184 с.

Данные на рис. 2 позволяют сделать вывод, который имеет значение для технических приложений индукционного нагрева, применяемого в разных отраслях машиностроения. В значительной области мощностей можно выбрать такую величину, при которой разъединяются кольца с разным натягом. Поскольку для внутренних колец подшипников, используемых в подвижном составе железных дорог, существует значительный разброс в величинах натягов<sup>1</sup>, возможность снятия колец с разбросом величин натягов при одном и том же значении мощности представляет значительный производственный интерес. При этом надо отметить, что проведенные вычисления для внутренних колец подшипников показывают, что это возможно: предел температуры разъединения кольца с осью, установленный нормативами ОАО «РЖД» (120 °C), не превышен в значительном диапазоне мощности (рис. 2). Для таких температурных профилей вполне можно ввести понятие средней температуры [17, с. 51], которое используют при выборе температуры нагрева для получения определенной величины натяга. Указанное обстоятельство позволяет говорить о необходимости создания такого типа индукционных нагревателей, в которых следует учитывать зависимость мощности съема кольца (и ему подобных деталей) от величины натяга. Возможность работы с одним значением мощности нагрева, изменяя только время нагрева, позволяет ввести в память устройства предельный режим нагрева для данной детали. Выход за рамки этого режима, т. е. нарушение регламента операции, может быть занесено в память нагревателя как ЧП.

Расчетно-теоретическая часть работы проведена на простой модели кольца, сопряженного натягом с осью. Полученные результаты будут полезны для работы с деталями, сопряженными с осью, например для бандажей станов холодного волочения труб, бандажей центров колесных пар локомотивов, ходовых колец транспортных средств, в том числе эскалаторов метрополитенов. По всем указанным деталям у специалистов НПК «Томские индукционные системы» есть опыт внедрения индукционных нагревателей.

**Заключение.** Результаты представленной здесь работы описывают физические процессы, происходящие в цилиндрической детали, сопряженной натягом с осью, при индукционном нагреве. Показано, что существуют две области мощности индукционного нагрева, когда температура внешней поверхности кольца достигает уровня, при котором кольцо снимается без натяга. Для относительно малых мощностей (до 5–6 кВт) температура разъединения практически не зависит от мощности; в этой области мощность пропорциональна квадрату величины натяга. При высоких значениях мощности (более 6 кВт) температура разъединения пропорциональна мощности.

При увеличении частоты электромагнитного поля температура разъединения деталей начинает зависеть от мощности и пропорциональна ей, а области независимости температуры разъединения деталей от мощности, вероятно, не существует.

Важным для технологического аспекта машиностроительного производства при проектировании и производстве высокочастотных индукционных нагревателей является вывод о необходимости учета значительной зависимости температуры от величины натяга сопряженных деталей, при которой осуществляется съем детали. Вместе с тем необходимо иметь возможность плавно менять и регистрировать развиваемую индуктором мощность и время нагрева.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Н. В. Скугаревской за полезную критику работы и П. В. Дудину за большую помощь в процессе подготовки и оформления статьи.

**Acknowledgments:** the authors express their gratitude to N. V. Skugarevskaya for useful criticism and P. V. Dudin for great assistance in preparing the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. М.: Оборонгиз, 1947. 291 с. [Vologdin V. P. *Surface Induction Hardening*. Moscow: Oborongiz; 1947. 291 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rkvvqs>.
2. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 471 с. [Lozinskiy M. G. *Commercial Use of Induction Heating*. Moscow: Izd. Akad. Nauk USSR; 1958. 471 p. (In Russ.)].
3. Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева / В. Б. Демидович [и др.] // Индукционный нагрев. 2012. № 3 (21). С. 26–28 [Demidovich V. B., Maslikov P. A., Grigor'ev E. A., Olenin V. A. Innovative technologies for processing titanium alloys using induction heating. *Induction heating*. 2012;(3):26-28. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pcbutr>.
4. Немков В. С. Достижения в технологии изготовления закалочных индукторов // Индукционный нагрев. 2008. № 1 (3). С. 9–11 [Nemkov V. S. Advancements in induction heating tooling technology. *Induction heating*. 2008;(1):9-11. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/kxnshx>.
5. Демидович В. Б. О точности вычисления температурных полей при индукционном нагреве // Индукционный нагрев. 2013. № 1 (23). С. 46 [Demidovich V. B. About the accurate computation of temperature fields at induction heating. *Induction heating*. 2013;(1):46. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pxqsij>.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1982. 621 с. [Landau L. D., Lifshits E. M. *Theoretical Physics. Vol. 8 Electrodynamics of Continuous Media*. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1982. 621 p. (In Russ.)].

7. Деформация цилиндрических деталей, сопряженных с осью, при индукционном нагреве / В. И. Дудин [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 73–77 [Dudin V. I., Lelekhov S. A., Sushko A. V., Feshchukov A. N. Deformation of cylindrical parts mated with an axis during induction heating. *Russian Engineering Research*. 2021;(12):73–77 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-12-73-77>.

8. Владимиров В. С. Уравнения математической физики: учеб. для физ.-техн. спец. вузов. 5-е изд., доп. М.: Наука, 1988. 512 с. [Vladimirov V. S. *Equations of Mathematical Physics*. 5th ed. Moscow: Nauka; 1988. 512 p. (In Russ.)].

9. Князева А. Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. 356 с. [Knyazeva A. G. *Thermophysical foundations of modern high-temperature technologies: a textbook*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing; 2009. 356 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/qjydw>.

10. Физические величины: справ. / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Grigor'ev I. S., Meilikhov E. Z. *Handbook of Physical Values*. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 1232 p. (In Russ.)].

11. Steinmetz C. P. *Theory and calculation of transient electric phenomena and oscillations*. N.Y.: McGraw Publishing Company; 1909. 593 p.

12. Ермоленко Д. В., Юфев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 1. С. 48–53 [Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A. Test results of the resonant single-wire power transmission system for induction heating of the switch rail. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(1):48–53. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-48-53>.

13. Котельников И. А., Черкасский В. С. Скин-эффект в задачах: электронный учеб. Новосибирск, 2014. 82 с. [Kotel'nikov I. A., Cherkasskiy V. S. *Skin effect in problems: electronic textbook*. Novosibirsk; 2014. 82 p. (In Russ.)].

14. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с. [Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V., Astakhov Yu. I., Gerasimov V. I., Golen'shina L. G., et al. *Database of Steels and Alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 2003. 784 p. (In Russ.)].

15. Коэффициент температуропроводности стали 16X12B2FTaP в широком интервале температур / А. Ш. Агажанов [и др.] // Вестник НГУ. Серия Физика. 2013. Т. 8, № 3. С. 163–167 [Agazhanov A. Sh., Savchenko I. V., Samoshkin D. A., Stankus S. V., Dutova O. S. Thermal diffusivity of 16Kh12V2FTaR steel in a wide temperature range. *Vestnik NSU. Series: Physics*. 2013;8(3):163–167 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2013-8-3-163-167>.

16. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов: учеб. для вузов. 18-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 542 с. [Feodos'ev V. I. *Strength of Materials. College Textbook*. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University; 2021. 542 p. (In Russ.)].

17. Дунаев П. Ф., Леанков О. П., Варламова Л. П. Допуски и посадки. Обоснование выбора. М.: Высшая школа, 1984. 112 с. [Dunaev P. F., Leankov O. P., Varlamova L. P. *Tolerances and fittings. Choice justification*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1984. 112 p. (In Russ.)].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Владимир Иванович ДУДИН**, канд. техн. наук, советник директора по науке, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634012, г. Томск, пр. Кирова, д. 58, стр. 7, офис 1010), AuthorID: 1187696, <https://orcid.org/0000-0002-6271-6413>

**Сергей Андреевич ЛЕЛЕХОВ**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634012, г. Томск, пр. Кирова, д. 58, стр. 7, офис 1010), AuthorID: 609053, <https://orcid.org/0000-0002-8738-0880>

**Алексей Николаевич ФЕЩУКОВ**, директор, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634021, г. Томск, ул. Шевченко, д. 45/2)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir I. DUDIN**, Cand. of Sci. (Eng.), Director's Advisor for Science, TomInduktor Research and Production Company (634012, Tomsk, 58/7, Office 1010, Kirova Ave.), Author ID: 1187696, <https://orcid.org/0000-0002-6271-6413>

**Sergey A. LELEKHOV**, Cand. of Sci. (Eng.), Leading Researcher, TomInduktor Research and Production Company (634012, Tomsk, 58/7, Office 1010, Kirova Ave.), Author ID: 609053, <https://orcid.org/0000-0002-8738-0880>

**Alexey N. FESHCHUKOV**, Director, TomInduktor Research and Production Company (634021, Tomsk, 45/2, Shevchenko St.)

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Владимир Иванович ДУДИН**. Предложение и обоснование концепции исследования как в теоретическом плане, так и в области экспериментальных работ, подготовка материала для публикации, написание и редактирование статьи (40%).

**Сергей Андреевич ЛЕЛЕХОВ**. Разработка и настройка программы компьютерных расчетов, участие в отборе материала для публикации (40%).

**Алексей Николаевич ФЕЩУКОВ**. Обеспечение подготовки экспериментального материала для публикации (20%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Vladimir I. DUDIN**. Proposal and justification of the research concept in theoretical and experimental terms, preparation of contents for publication, article writing and editing (40%).

**Sergey A. LELEKHOV**. Development and configuration of a computer software, participation in the selection of contents for publication (40%).

**Alexey N. FESHCHUKOV**. Ensuring the preparation of experimental materials for publication (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 07.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 14.02.2023, рецензия от второго рецензента получена 10.05.2023, принята к публикации 19.07.2023.  
The article was submitted 07.02.2023, first review received 14.02.2023, second review received 10.05.2023, accepted for publication 19.07.2023.