

УДК 539.3

Е.Д. ГРОЗЕНОК, Э.А. СИМСОН, А.В. СТЕПУК, С.Ю. ШЕРГИН

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЗАГОТОВОК ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ

Проведено математическое моделирование процесса индукционного нагрева цилиндрической заготовки для подшипникового кольца и получен рациональный режим работы индуктора. С учетом остывания заготовки получено распределение поля температур перед началом процесса штамповки. Численное решение, полученное методом конечного элемента, сравнивалось с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** цилиндрическая заготовка, индукционный нагрев, рациональный режим, термоэлектромагнитная задача, метод конечных элементов.

**Введение.** Процесс изготовления подшипниковых колец включает выполнение цепочки последовательных технологических операций: индукционный нагрев цилиндрической заготовки, штамповку и раскатку. Первый этап включает индукционный нагрев цилиндрической заготовки до необходимой температуры, что позволяет в дальнейшем эффективно производить ее пластическое деформирование, т.к. для успешной реализации цепочки технологических операций нагретый металл должен иметь определенную микроструктуру, физико-химические свойства. При выборе режима работы индукционного нагревателя необходимо исключить пережог, неравномерный нагрев или недогрев заготовки, так как они могут привести к термическим напряжениям, хрупкости, низкой прочности материала конечного изделия (кольца подшипника). Поэтому возникает необходимость в проведении тщательного моделирования и выбора рационального режима нагрева.

**Анализ последних исследований и литературы.** Исследованиям индукционного нагрева заготовок для различных технологических процессов (**ковки, штамповки, рубки, прокатки, гибки, а также закалки**) посвящено ряд работ [1-4]. Прогнозированию структуры и свойств стали при термической обработке посвящены работы [1-3]. Задача теплопроводности для индукционного нагрева подшипниковых колец перед раскаткой рассмотрена в работах [4, 5]. Процессу нагрева нескольких заготовок, перемещающихся с постоянной скоростью через индуктор, посвящена работа [6], в которой представлено решение задачи оптимального управления процессами периодического и непрерывного индукционного нагрева заготовок по критериям быстродействия и минимума расхода энергии. Отмечено, что для большого диапазона диаметров заготовок не целесообразно использовать универсальный индуктор, так как с увеличением отношения внутреннего диаметра индуктора к диаметру заготовки уменьшается связь магнитного поля индуктора с заготовкой. Вследствие этого для каждого типоразмера заготовок и индукторов требуется проводить экспериментально-теоретическое моделирование процесса нагрева и выбор рационального режима работы нагревателя, обеспечивающего необходимые характеристики температурного поля в заготовке. Математическое моделирование процесса индукционного на-

грева и численно-аналитические методы расчета электромагнитных систем индуктор-заготовка представлены в многочисленных работах Кувалдина [7]. Однако, при численном решении связанной нелинейной нестационарной термоэлектромагнитной краевой задачи с учетом нелинейной зависимости физико-химических и структурных характеристик материала от температуры вводятся определенные допущения (не учитывается влияние нагрева заготовки на ток в индукторе), поэтому для гарантии достоверности результатов необходимо сравнение их с экспериментальными данными.

**Целью** данной статьи является исследование электромагнитного и теплового полей, возникающих в цилиндрической стальной заготовке, предназначенной для подшипникового кольца при индукционном нагреве, а также выбор рационального режима работы индуктора.

**Постановка задачи.** Для реализации последующего этапа качественной штамповки необходимо чтобы объемное неравномерное температурное поле цилиндрической заготовки с учетом времени остывания между индукционным нагревом и осадкой заготовки под прессом должно отвечать жестким требованиям: максимальная температура нагрева  $T_{\max} = 1150$  °С, а перепад температуры  $T_{\max} - T_{\min} = 50$  °С. Математическая модель, которая описывает индукционный нагрев цилиндрической заготовки, включает уравнения электромагнитного поля Максвелла и нестационарное уравнение теплопроводности Фурье с соответствующими граничными и начальными условиями с учетом связанности физических процессов. Уравнения электромагнитного поля имеют вид [8]

$$\operatorname{rot} H = \sigma(T)E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu(T) \frac{\partial H}{\partial t};$$

$$j = \sigma(T)E + \frac{\partial D}{\partial t},$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $E$  – напряженность электрического поля;  $B$  – магнитная индукция;  $j$  – плотность тока;  $D$  – электрическая индукция;  $\sigma(T)$  – электрическая проводимость и  $\mu(T)$  магнитной проницаемости, нелинейно зависящие от температуры  $T$ . Наибольшая плотность тока  $j_r$  при нагреве цилиндрической заготовки будет на глубине скин-слоя  $\delta$ , а к центру снижаться экспоненциально

$$j_r = j_0 e^{-kr}$$

Глубина проникновения  $\delta$  определяется зависимостью:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_e}{\omega\mu_0\mu}}$$

где  $\omega = 2\pi f$  угловая частота,  $f$  – частота тока,  $\rho_e$  – удельное сопротивление материала заготовки,  $\mu_0$  – проницаемость вакуума,  $\mu$  – удельная проницаемость материала заготовки. Плотность источников тепла равна

$$p(t) = \sigma(T)E^2(t) = \frac{1}{\sigma(T)}j^2(t)$$

При температуре 721 °C в углеродистой стали происходит выделение теплоты при превращении исходной структуры перлита в аустенит, плотность источников которой можно определить как

$$Q = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

где  $L$  – объемная плотность источника тепла,  $\Psi$  – объемная доля превращенного аустенита,  $\rho$  – плотность.

Нелинейное уравнение теплопроводности для расчета температурного поля в заготовке имеет вид:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad} T) + Q(t) + p(t)$$

где  $C(T)$  – теплоемкость и  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности металла, зависящие от температуры

Так как при нагреве поверхностного слое заготовки до температуры 1200 °C, величина теплового потока в радиальном направлении на порядок больше потока в осевом направлении, поэтому можно пренебречь передачей тепла вдоль оси цилиндрической заготовки (торцы заготовки можно считать теплоизолированными), на боковой же поверхности имеет место конвективная и лучистая теплоотдача. Граничные условия на поверхности заготовки имеют вид:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{нов}} = \alpha_k (T_{\text{нов}} - T_{\text{cp}}) + \sigma_\epsilon (T_{\text{нов}}^4 - T_{\text{cp}}^4)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\sigma_\epsilon$  – коэффициент теплоотдачи излучением,  $T_{\text{нов}}$  – температура поверхности,  $T_{\text{cp}}$  – температура окружающей среды.

**Численная реализация и обсуждение результатов.** Рассмотренный подход был применен для определения рационального режима работы индуктора, который охлаждается водой до температуры 60 °C, цилиндрической заготовки из стали ШХ15 длиной  $l = 190$  мм и радиусом  $r = 50$  мм. Методом конечных элементов (МКЭ) была численно решена краевая нестационарная термоэлектромагнитная задача для определения распределения объемного поля температур. Конечноэлементная модель включает 60221 элементов и 16346 узлов. На рис. 1 приведена расчетная схема индуктора с заготовкой.

На рис. 2 приведены использованные в расчете графики, зависимости от температуры.

Нагрев заготовки осуществляется индуктором с частотой тока  $f = 800$  Гц и максимальной мощностью

$W = 40$  кВт за время  $t = 300$  с. Расчетным путем определялся рациональный режим нагрева заготовки. На рис. 3, а приведен график изменения во времени мощности индуктора, при котором происходит нагрев цилиндрической заготовки до максимальной температуры  $T_{\text{max}} = 1150$  °C с разностью температуры не более  $T_{\text{max}} - T_{\text{min}} = 40$  °C.

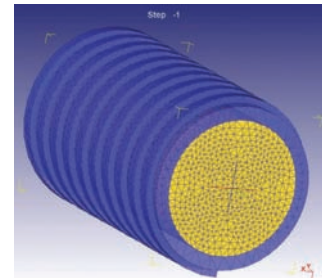


Рисунок 1 – Расчетная схема

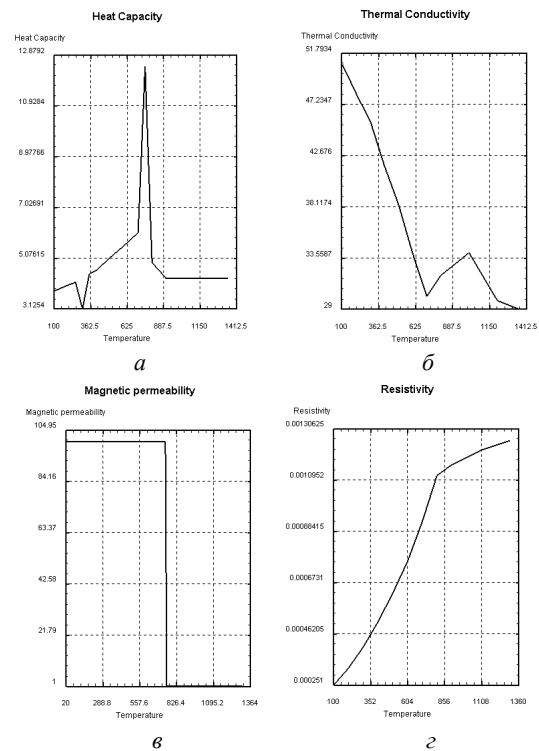


Рисунок 2 – Зависимости значений физических характеристик от температуры для стали ШХ15: а – теплоемкости; б – теплопроводности; в – магнитной проницаемости; г – электрической проводимости материала стальной заготовки

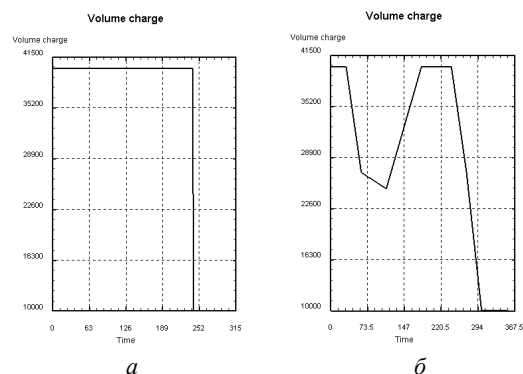


Рисунок 3 – Изменение мощности индуктора от времени

На рис. 4 представлено распределение поля температуры в сечении заготовки после нагрева в индукторе. Так температура на поверхности равна  $T_{пов} = 1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на оси заготовки  $T_{мин} = 1110\text{ }^{\circ}\text{C}$  при максимальном уровне температуры внутри  $T_{max} = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так как в процессе индукционного нагрева заготовки происходит отвод тепла с внешней ее поверхности, то во внутренней объеме образуется зона, нагретая на более высокую температуру, что может привести к перегреву внутренних слоев стали. Для перехода к последующей технологической операции – штамповке кольца необходимо решить задачу остывания заготовки в виде нестационарной задачи теплопроводности с учетом полученного после нагрева температурного поля. В качестве граничных условий задавался лучистый и конвективный теплообмен с воздухом ( $T_{cp} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на всех поверхностях цилиндрической заготовки. На рис. 5 приведено температурное поле заготовки после остывания в течении  $t = 5\text{ с}$ , после чего начинается процесс штамповки. Следует отметить перераспределение и снижение уровней температур. Так на оси за счет теплопроводности температура поднялась до  $T_{ocu} = 1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на поверхности за счет теплоотвода появились зоны с минимальной температурой  $T_{мин} = 1090\text{ }^{\circ}\text{C}$  и максимальной температура нагрева  $T_{max} = 1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

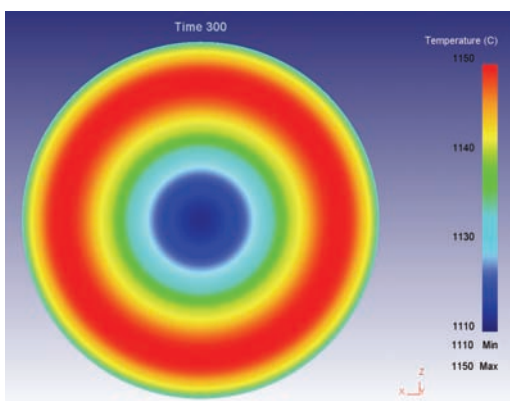


Рисунок 4 – Распределение поля температуры в сечении заготовки при нагреве в индукторе

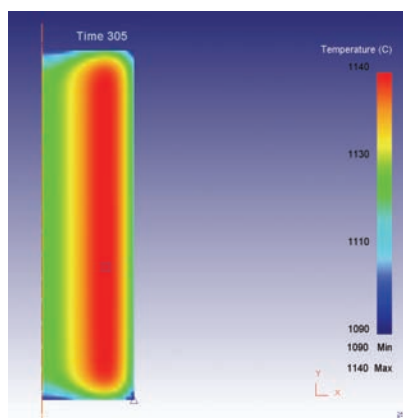


Рисунок 5 – Распределение поля температуры в заготовке после остывания

Для проверки адекватности математической модели, описывающей процесс индукционного нагрева

заготовки, была решена задача идентификации температурного поля для режима нагружения индуктора приведенного на рис. 3, б. Проводилось пирометрическое измерение температуры заготовки на боковой поверхности (радиус  $r = 50\text{ мм}$ ) и в центре (радиус  $r = 0$ ) торцевой части заготовки. На рисунке 6 представлены численно найденное распределение температуры на торце заготовки. В табл. 1 приведены значения температуры, полученные расчетным и экспериментальным путем.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения температур на торце образца

Радиус $r$ , мм	Расчетное значение $T, ^{\circ}\text{C}$	Измеренное значение $T, ^{\circ}\text{C}$
0	1030	1030
50	1140	1130

Сравнение результатов показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений. Так погрешность для перепада температуры между поверхностью и осью заготовки, полученная расчетным и экспериментальным путем, составляет 9%, что свидетельствует об адекватности модели реальному процессу.

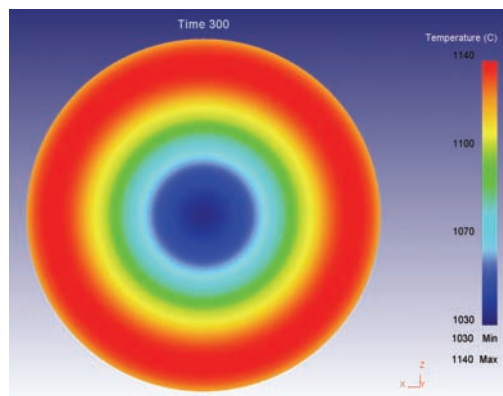


Рисунок 6 – Распределение вычисленного МКЭ поля температуры в сечении заготовки

**Выводы.** В работе проведено численное исследование индукционного нагрева цилиндрической заготовки подшипникового кольца. При помощи метода конечных элементов решена нестационарная связанная термоэлектромагнитная краевая задача и определен рациональный режим работы индуктора, при котором температурное поле в заготовке соответствует технологическим требованиям для последующего процесса штамповки. При максимально допустимой температуре нагрева достигнут минимальный перепад температур в объеме заготовки, то есть обеспечен ее более равномерный нагрев. Экспериментально подтверждена достоверность модели расчета температурного поля.

**Список литературы:** 1. Denis S. Revue de Metallurgie / S. Denis // CIT/Science et Genie des Materiaux. - fevrier 1997. – P. 157-175. 2. Федосов С.А. Компьютерная программа для расчета параметров термического цикла при импульсном поверхностном нагреве / С.А. Федосов // Материалы и упрочняющие технологии –99. – V11 Российская научн. технич.

конференция, 6-8 окт. 1999. – Курск. – С. 31-33 **3.** Rödel J. Werkstoffphysikalische Model für das Randschichthärten von Stahl. (Физические модели поверхностной закалки сталей) / J.Rödel // HTM: Härter. techn. Mitt. – 1999. – 54, № 4. – P. 230-240. **4.** Князев С.В. Моделирование стационарного распределения температуры металла в проходном индукционном нагревателе / С.В.Князев, А.И. Данилушкин, А.П. Мостовой // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Иркутск: ИрГТУ, 2012. – № 9 (68). – С. 41-46. **5.** Базаров А.А. Построение численной модели нестационарного теплообмена цилиндрических заготовок при индукционном нагреве / А.А. Базаров, Н.А. Базир, Л.С.Зимин // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2007. – № 2 (20). – С. 181-183. **6.** Князев С.В. Математическая модель индукционного нагрева подшипниковых колец перед раскаткой / С.В. Князев, А.И. Данилушкин, С.И. Семенов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж: ВГТУ, 2012. – Том 8. – № 10-1-2012. – С. 101-103. **7.** Кувалдин А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева / А.Б.Кувалдин. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 80 с. **8.** Подстригач Я.С. Магнетотермоупругость проводящих тел / Я.С. Подстригач, Я.И. Бурак, В.Ф. Кондрат. – К.: Наукова думка, 1982. – 248 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Denis, S. Revue de Metallurgie. CIT/Science et Genie des Materiaux. fevrier, 1997, pp. 157-175. **2.** Fedosov, S.A. Komp'juternaja programma dlja rascheta parametrov termicheskogo cikla pri impul'snom poverhnochnom nagreve. Materialy i uprochnjajushhie tehnologii – 99/VII Rossijskaja nauchn. tehnič. Konferencija (6-8 okt. 1999), Kursk, pp. 31-33. **3.** Rödel J. Werkstoffphysikalische Model für das Randschichthärten von Stahl. HTM: Härter. techn. Mitt. 1999, 54, No 4, pp. 230-240. **4.** Knjazev S.V., Danilushkin A.I., Mostovoj A.P. Modelirovanie stacionarnogo raspredelenija temperatury metalla v prohodnom indukcijonnom nagrevatele. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, Irkutsk: IrGTU, 2012, No 9 (68), pp. 41-46. **5.** Bazarov A.A., Bazir H.A., Zimin L.S. Postroenie chislennoj modeli nestacionarnogo teploobmena cilindricheskikh zagotovok pri indukcijonnom nagreve. Vestnik SamGTU. Ser. Tehničeskije nauki, No 2, 20 (2007), pp. 181-183. **6.** Knjazev S.V., Danilushkin A.I., Semenov S.I. Matematicheskaja model' indukcijonno nagreva podshpnikovyh kolec pered raskatkoj. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, Voronezh: VGTU, 2012, vol. 8, No 10-1 (2012), pp. 101-103. **7.** Kuvaldin, A.B. Teorija indukcijonno i dijelektricheskogo nagreva. Moscow: Izd-vo MJeI, 1999, 80 p. **8.** Podstrigach Ja.S., Burak Ja.I., Kondrat V.F. Magnetotermouprugost' provodjashhih tel. Kiev: Naukova dumka, 1982, 248 p.

*Поступила (received) 27.07.2016.*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Грозенюк Евгений Денисович** – аспирант, каф. сопротивления материалов, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

**Grozenok Ievgen** – Postgraduate student, Strength of materials Department, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

**Симсон Эдуард Альфредович** – докт. техн. наук, каф. сопротивления материалов, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upec.ua

**Simson Eduard** - Doctor of Sciences (High Ph. D.) Strength of materials' Department, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upec.ua

**Степук Александр Владимирович** – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Stepuk Alexander**- Candidate of Physics -Mathematical Sciences (Ph. D.), Sr Researcher, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Шергин Сергей Юрьевич** - ст.преподаватель, каф. сопротивления материалов, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

**Shergin Sergei** – Sr Lecturer, Strength of materials Department, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua