

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-38-55  
УДК 539.3, 621.77

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБЪЕМНО - ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ КОЛЕЦ КАССЕТНОГО ПОДШИПНИКА**

©Гиршфельд А.М.<sup>1</sup>, Симсон Э. А.<sup>2</sup>

*Индустриальная группа У.П.Э.К.<sup>1</sup>,*

*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"<sup>2</sup>*

### **Информация об авторах:**

**Гиршфельд Анатолий Моисеевич:** ORCID: 0000-0002-3759-7280; [office@upc.ua](mailto:office@upc.ua); Президент АО  
Индустриальная группа «У.П.Э.К.»; ул. Маршала Батицкого, 4, г.Харьков, 61038, Украина.

**Симсон Эдуард Альфредович:** ORCID: 0000-0003-4178-4828; [prof.simson@gmail.com](mailto:prof.simson@gmail.com); доктор технических наук; профессор кафедры «Механика сплошных сред и сопротивления материалов»; НТУ «Харьковский Политехнический Институт»; ул. Кирпичева, 2, г.Харьков, 61002, Украина.

Одной из последних тенденций в современном машиностроении является применение инновационных «закрытых» подшипниковых узлов с повышенным межсервисным и гарантийным сроком, которые отвечают самым высоким требованиям в плане надежности и долговечности. Для достижения высоких эксплуатационных показателей таких подшипниковых узлов необходимо при их изготовлении использовать современные технологии и передовое оборудование. В работе рассмотрены проблемы разработки математической модели и численных методов расчета физико-механических параметров материала кольца кассетного подшипника во время и после электроиндукционной закалки, а также оптимизации ее режимов с целью обеспечения необходимой картины твердости, остаточных напряжений и аустенита. Полученные результаты могут быть использованы при создании промышленной технологии и оборудования для применения при массовом производстве кассетных подшипников.

В работе получена математическая мульти-физическая модель, состоящая из взаимосвязанных уравнений электромагнитного поля Максвелла и уравнений теплопроводности Фурье с соответствующими граничными условиями, дополненная соотношениями, моделирующими превращение микроструктуры стали из одного состояния в другое в процессе термообработки.

Математическая модель верифицирована на тестовых задачах, а также «настроена на подшипниковую сталь» (по результатам решения тестовых задач идентифицированы недостающие характеристики стали).

Решены задачи моделирования одношаговой объемной закалки внутреннего кольца и трех-этапной объемно-поверхностной закалки наружного кассетного подшипника с оптимизацией режимов закалки исходя из условий обеспечения твердости на поверхности  $59 < \text{HRC} < 63$  (с глубиной слоя  $s > 2$  мм) и в ядре заготовки -  $\text{HRC} < 45$  с достижением минимума потребляемой энергии.

**Ключевые слова:** *объемно-поверхностная электроиндукционная закалка; кассетный подшипниковый узел; мультифизическая математическая модель*

**Гиршфельд А.М., Симсон Е.А.** «Моделювання та оптимізація режимів об'ємно-поверхневого електроіндукційного закалювання кілець касетного підшипника».

Однією з останніх тенденцій в сучасному машинобудуванні є використання інноваційних «закритих» підшипникових вузлів з підвищеним міжсервісним та гарантійним

терміном, які відповідають найвищим вимогам в плані надійності та довговічності. Для досягнення високих експлуатаційних показників таких підшипникових вузлів необхідно при їх виготовленні використовувати сучасні технології та передове обладнання. В роботі розглянуті проблеми розробки математичної моделі і чисельних методів розрахунку фізико-механічних властивостей матеріалу кільця касетного підшипника під час та після електроіндукційного гарту, а також оптимізації його режимів з метою забезпечення необхідної картини твердості, залишкових напруг та аустеніту. Отримані результати можуть бути використані при створенні промислової технології і обладнання для застосування при масовому виробництві касетних підшипників.

В роботі отримано математичну мульти-фізична модель, що складається з взаємозв'язаних рівнянь електромагнітного поля Максвелла і рівнянь теплопровідності Фур'є з відповідними граничними умовами, доповнена співвідношеннями, що моделюють перетворення мікроструктури сталі з одного стану в інший в процесі термообробки.

Математична модель верифікована на тестових завданнях, а також «налаштована на подшипникову сталь» (за результатами вирішення тестових завдань ідентифіковані бракуючі характеристики сталі).

Вирішені задачі моделювання однокрокової об'ємної гарту внутрішнього кільця і трьох-етапної об'ємно-поверхневого гарту зовнішнього касетного підшипника з оптимізацією режимів гартування виходячи з умов забезпечення твердості на поверхні  $59 < \text{HRC} < 63$  (з глибиною шару  $s > 2$  мм) і в ядрі заготовки –  $\text{HRC} < 45$  з досягненням мінімуму споживаної енергії.

**Ключові слова:** *об'ємно-поверхневий електроіндукційний гарт; касетний підшипниковий вузол; мультифізична математична модель*

**Girshfeld A., Simson E.** «Modeling and optimization of volume-surface electric induction hardening modes for cassette bearing rings».

One of the last tendencies in modern machine engineering is application of innovative "closed" bearing units with increased service intervals and warranty period that correspond to the top requirements in regard to reliability and durability. To get high performance figures of such bearing units it is required to use modern technologies and advanced equipment during their production. Problems in development of mathematical model and numerical methods for calculation of physical and mechanical parameters of material of cassette bearing rings during and after electric induction hardening and optimization of its modes to provide required picture of hardening, residual stresses and austenite are considered in this paper. The obtained results can be used during creation of industrial technology and equipment for application during mass production of cassette bearings.

In the work, a mathematical multi-physical model is obtained, consisting of the interconnected equations of the Maxwell electromagnetic field and the Fourier heat equations with the corresponding boundary conditions, supplemented by relations modeling the transformation of the microstructure of steel from one state to another during heat treatment.

The mathematical model was verified on test problems, and also "tuned to bearing steel" (according to the results of solving test problems, the missing characteristics of steel were identified).

The research solved the problems of modeling one-step volumetric hardening of the inner ring and three-stage volumetric-surface hardening of the outer cassette bearing with optimization of hardening conditions based on the conditions for ensuring hardness on the surface  $59 < \text{HRC} < 63$  (with a layer depth  $s > 2$  mm) and in the core of the workpiece –  $\text{HRC} < 45$  with a minimum of energy consumption.

**Keywords:** volume-surface electric induction hardening; cassette bearing assembly; multi-physical mathematical model.

## 1. Вступление.

Стандартная цементационная закалка обеспечивает весьма точное значение глубины закаленного слоя, однако полный цикл химико-термической обработки длится около суток. Электроиндукционная закалка, как альтернатива цементационной закалке изучена достаточно давно и более 40 лет используется АО ХАРП при изготовлении внутренних колец обычных буксовых цилиндрических подшипников, а в последнее время и для закалки внутренних колец закрытых подшипниковых узлов – Duplex TBU 1520 HARP. При этом используется Сталь ШХ4, разработанная еще в советские время специально для индукционной закалки. Благодаря свойствам этой стали необходимую картину твердости по материалу кольца (поверхностные слои – 59...63 HRC, внутренние слои «сердцевина»  $\leq 45$  HRC) удается достичь одним этапом объемной индукционной закалки. Однако геометрия наружного кольца конического двухрядного подшипника закрытого типа (кассеты) делает одношаговую технологию крайне затруднительной, из-за трудности обеспечения равномерного поля температур как при индукционном разогреве, так и при охлаждении, а для тонкого кончика крайне велик риск сквозной объемной закалки и как следствие - хрупкого разрушения, особенно в случае возникновения ударной нагрузки. В статье рассматривается математическое моделирование индукционной закалки внутренних и наружных колец конической «кассеты» и оптимизация режимов закалки, а также результаты тестовых задач и натурные эксперименты.

Целью данного исследования является разработка математической модели и численных методов расчета физико-механических параметров материала кольца кассетного подшипника во время и после электроиндукционной закалки, а также оптимизация ее режимов с целью обеспечения необходимой картины твердости, остаточных напряжений и аустенита. В конечном счете исследование направлено на создание промышленной технологии и оборудования для применения при массовом производстве кассетных подшипников.

## 2. Анализ публикаций

Весьма подробный обзор МКЭ моделирования индукционной закалки приведен в работе [1]. Одна из первых работ, в которой сравнивается несколько МКЭ пакетов при моделировании индукционной закалки - статья [2], в которой основное внимание уделено верификации модели путем детального сравнения численных и экспериментальных результатов. В работе [3] результаты решения связанной задачи расчета электромагнитного и температурного полей для углеродистых сталей также сравниваются с экспериментальными данными, демонстрируя неплохую точность моделирования в двух из трех контролируемых областях.

В работе [4], озаглавленной как «альтернативное теоретико – экспериментальное исследование», на самом деле рассмотрены преимущества одновременного наличия математической модели и экспериментальных данных для последующего оптимального выбора формы индуктора, частоты и силы тока длительности воздействия на примере закалки корпусного элемента подшипникового узла.

Особенности закалки в среднеуглеродистых низколегированных сталях износостойких сталях изложены в работе [5] с помощью математического моделирования, целиком опирающегося на экспериментальные результаты.

Надо сказать, что несмотря на большое число работ, - немногие из них посвящены моделированию поверхностной закалки и совсем не удалось найти работы, посвященные особенностям поверхностной закалки подшипниковых колец.

Подробное численное исследование объемно – поверхностной закалки ступицы выполнено в работе [6]. Приведены впечатляющие результаты совпадения численных и экспериментальных данных, что явилось результатом внимательного анализа металлургических ТТТ-диаграмм как важной части моделирования.

В статье [7] применен двух-этапный подход к моделированию поверхностной закалки методом конечных элементов. На первом шаге решаются уравнения Максвелла для определения электро-магнитного поля от индуктора с учетом помещенного в поле закаливаемого образца (детали). На втором шаге решается задача теплопроводности под воздействием тепла, генерируемого в образце переменным полем. На самом деле задача является связанной и, таким образом, авторы отбрасывают обратную связь влияния температуры на магнитную проницаемость и электрическое сопротивление материала.

В отличие от большинства исследований, в работе [8] задача моделирования поверхностной закалки вала решается методом граничных элементов. Хотя именно для поверхностной закалки применение МГЭ представляется наиболее оправданным, тем не менее его применение сопряжено с многими нерешенными трудностями. Отсутствие надежных прикладных пакетов также осложняет продвижение метода в промышленных приложениях.

Особо необходимо отметить работу [9], в которой детально рассмотрены вопросы поверхностной закалки зубчатых передач.

### **3. Изложение основного материала.**

#### **3.1. Мульти-физическая математическая модель МКЭ.**

В работе используется мульти-физическая математическая модель, состоящая из взаимосвязанных систем уравнений Максвелла для описания электромагнитного поля и нестационарных уравнений теплопроводности Фурье с соответствующими граничными и начальными условиями.

$$\operatorname{rot} H = \sigma(H)E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu(T) \frac{\partial H}{\partial t}; \quad (2)$$

$$j = \sigma(T)E + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) + Q(t) + p(t), \quad (4)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $E$  – напряженность электрического поля;  $B$  – магнитная индукция;  $j$  – плотность тока;  $D$  – электрическая индукция;  $\sigma(T)$  – электрическая проводимость,  $\mu(T)$  – магнитная проницаемость,  $C(T)$  – теплоемкость и  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности металла, в свою очередь нелинейно зависящие от температуры  $T$ .

Индукционной нагрев базируется на трех известных физических явлениях: электромагнитной индукции, эффекте Джоуля и поверхностном эффекте. Согласно закону электромагнитной индукции в проводящем материале, движущемся со скоростью  $V$  в направлении  $x$  через магнитное поле с магнитным потоком  $\Phi$ , возникает индуцированное напряжение  $e$

$$e = -d\Phi / dt - vd\Phi / dx, \quad (5)$$

Это напряжение вызывает вихревые токи, которые генерируют электрическую мощность нагрева  $Pv$  в соответствии с законом Джоуля

$$Pv = \rho j^2, \quad (6)$$

здесь  $\rho$  – электрическое сопротивление материала.

Данные соотношения показывают, что в индукционной нагревательной системе существуют два типа напряжения и вихревых токов. Первое слагаемое в формуле (5) отвечает за напряжения и, соответственно, вихревые токи, вызванные изменением во времени магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого индуктором и проходящим через неподвижное тело по аналогии с короткозамкнутой обмоткой трансформатора. Второе слагаемое обусловлено скоростью  $V$  перемещения проводящего материала в неоднородном магнитном поле.

В соответствии с поверхностным эффектом плотность вихревых токов внутри проводящего тела подчиняется экспоненциальному закону:

$$j_z = j_0 \exp(-z/\delta), \quad (7)$$

где  $j_0$  – значение плотности тока на поверхности,  $\delta$  – глубина проникновения электромагнитного излучения (глубина скин-слоя). Распределение мощности нагрева по толщине в соответствии с выражениями (6) и (7) имеет вид:

$$Pv = P_{vo} \exp(-2z/\delta), \quad (8)$$

Согласно выражению (8) до 86% мощности нагрева формируется в поверхностном слое проводящего тела толщиной  $\delta$ .

Глубину скин слоя  $\delta$  чаще всего определяют по формуле

$$\delta = (\rho / \mu f)^{1/2}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $f$  – частота тока.

Дополнительное выделение теплоты в углеродистых сталях происходит при трансформации структуры материала из перлитной в аустенитную. При этом плотность дополнительных источников тепла можно определить как

$$Q = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (10)$$

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

Преобразование аустенита в мартенсит происходит по бездиффузионному закону и описывается формулой

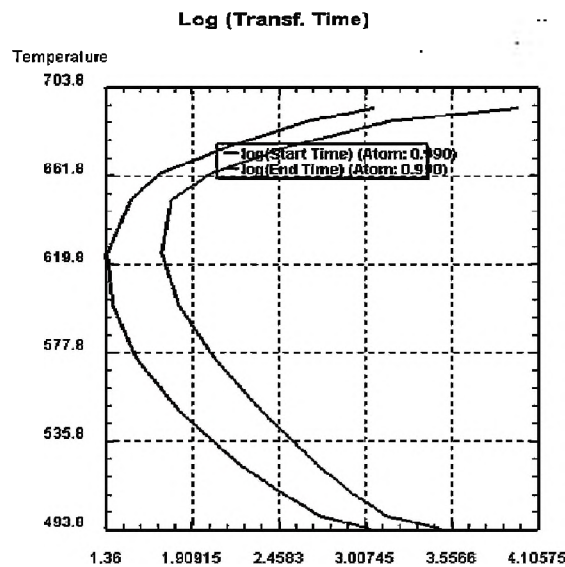
$$\zeta_m = 1 - \exp(\psi_1 T + (C - C_0)\psi_2 + \psi_4), \quad (11)$$

где  $T$  – текущая температура;  $C$  – текущее содержание углерода;  $C_0 = 0,45$ ;  $\psi_1 = 0,016$ ;  $\psi_2 = -0,001$ ;  $\psi_3 = -5,18$ . Граничные условия теплообмена на поверхности кольца приняты в виде

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{нов} = \alpha_k (T_{нов} - T_{cp}) + \sigma_e (T_{нов}^4 - T_{cp}^4), \quad (12)$$

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

В работе использовалась изотермическая диаграмма превращения аустенита в перлит для стали ШХ4, приведенная на рис. 1.



**Рис. 1.** Изотермическая диаграмма превращения аустенита в перлит для стали ШХ4

### 3.2. Тестовые расчеты.

Для тестирования математической модели индукционного нагрева и последующей закалки рассматривались следующие тестовые задачи:

- длинный образец в одновитковом индукторе;
- длинный образец в многовитковом индукторе;
- короткий образец (в размер индуктора);
- короткий образец с индуктором и ферритовыми «отражателями».

В двух первых тестовых расчетах использовался цилиндрический образец диаметром  $d = 30$  мм с одновитковым или многовитковым (5 витков) индуктором на частоте 60 кГц при величине воздушного зазора  $x = 5$  мм. Материал образца ШХ15, начальная структура – пластинчатый перлит, закалка производилась погружением в спокойную воду с температурой  $T = 30^\circ C$  в течение  $t = 800$  сек. Ниже приведены результаты моделирования индукционного нагрева и закалки образца в 5-ти витковом индукторе при времени работы индуктора  $t_n = 5$  сек, активная мощность индуктора  $W = 22$  кВт, шаг решателя по времени  $t_p = 0,00125$  сек. Расчетная глубина закаленной зоны  $s_{max} = 1,4$  мм оказалась равной, что всего на 0,08 мм (5,7%) отличается от значения, полученного при эксперименте.

На рис. 2 приведено распределение температуры после 5 сек. нагрева. На рис. 3 – распределение твердости по Роквеллу после 800 сек. охлаждения в спокойной воде. Для дополнительной настройки свойств материала в соответствии с натурным экспериментом, была проведена серия расчетов по определению влияния соотношения высоты заготовки и индуктора на режим нагрева. Использовалась осесимметричная расчетная схема, материал образца – подшипниковая сталь ШХ4; диаметр образца – 30 мм; высота образца 120 мм; высота индуктора 8 мм; частота тока 66 кГц; прикладываемая мощность 5 кВт; время нагрева 20 секунд. Размер конечных элементов детали в районе индуктора был существенно уменьшен, по сравнению с периферией (коэффициент 1:10). На рис. 4 и 5 приведено распределение электрического и температурного полей через 10 сек., а на рис. 6 и 7 – через 20 сек. На рис. 8 приведено распределение твердости после закалки в воде ( $t = 800$  сек.).

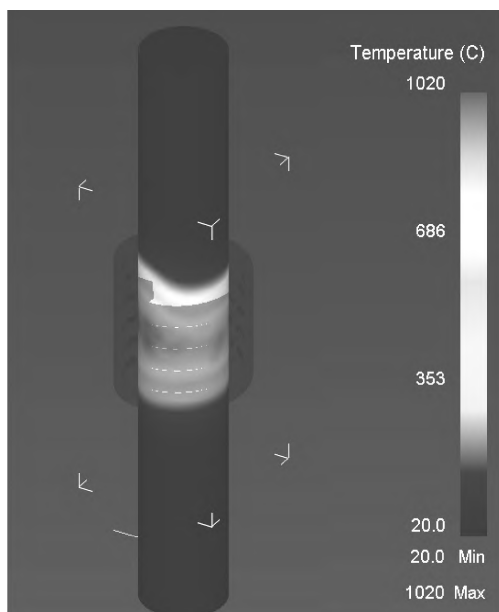


Рис. 2 Распределение температуры после 5 сек. нагрева

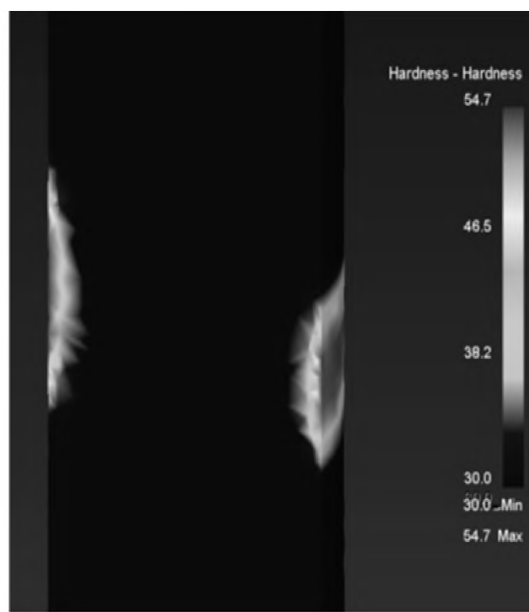


Рис. 3 Распределение твердости по Роквеллу после 800 сек. охлаждения в спокойной воде

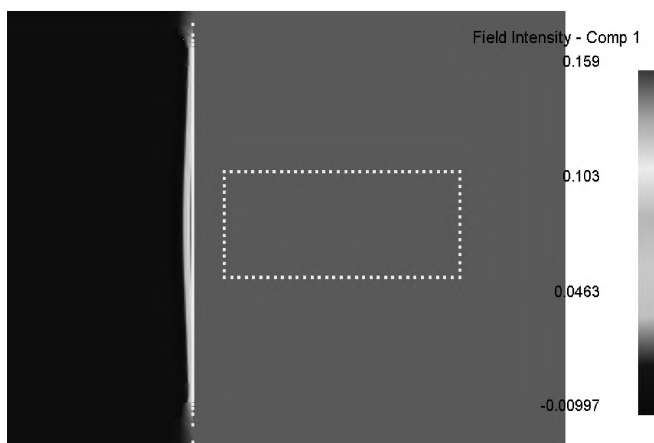


Рис. 4 Распределение электрического и температурного полей через 10 сек.

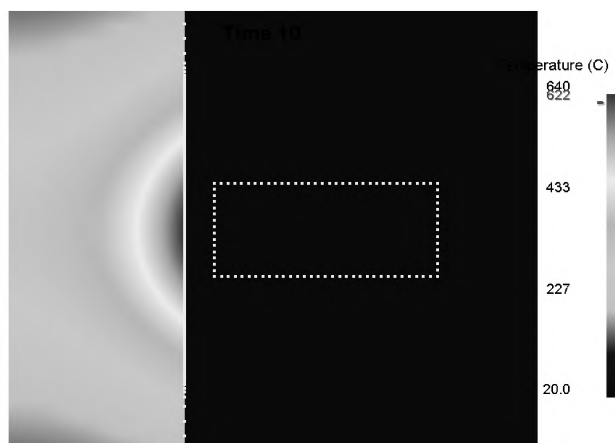


Рис. 5 Распределение электрического и температурного полей через 10 сек.

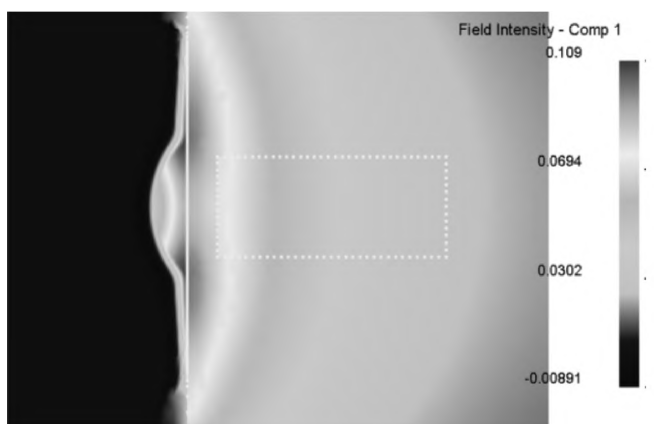


Рис. 6 Распределение электрического и температурного полей через 20 сек.

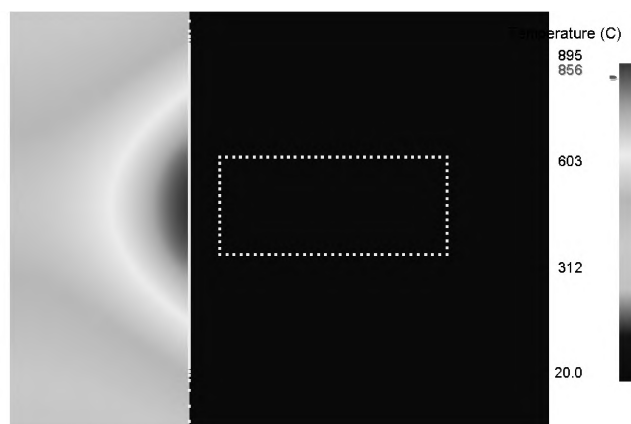
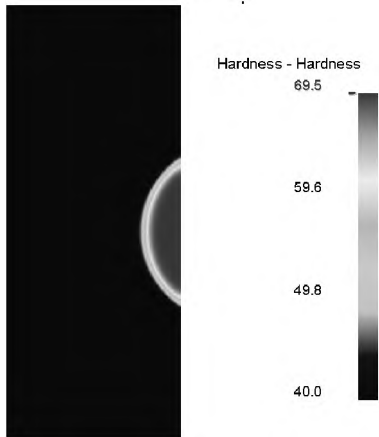


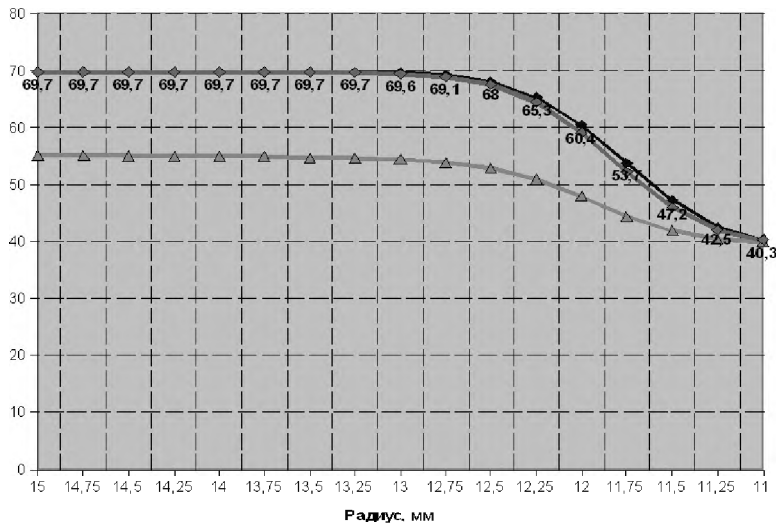
Рис. 7 Распределение электрического и температурного полей через 20 сек.



**Рис. 8** Распределение твердости после закалки в виде  $t = 800$  сек.

Реальное значение твердости в центре ядра оказалось примерно на 5 единиц ниже, что составляет примерно 7% погрешности, что вполне оправдано с учетом неточных данных о физико-механических и магнито-электрических свойствах материалов, фазовом переходе. Также был поставлен численный эксперимент по оценке влияния интенсивности охлаждения на результаты закалки. Моделировалось три вида охлаждения, каждый из которых характеризовался своим коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ : - охлаждение в спокойной воде  $\alpha = 0,2$ ; - охлаждение быстродвижущимся потоком воды  $\alpha = 2$ ; - интенсивное охлаждение водяным душем  $\alpha = 40$ .

На рис. 9 приведены расчетные зависимости твердости (вертикальная шкала) по глубине образца (радиус) для  $\alpha = 0,2$  – зеленая кривая,  $\alpha = 2$  – красная кривая,  $\alpha = 40$  – синяя кривая.



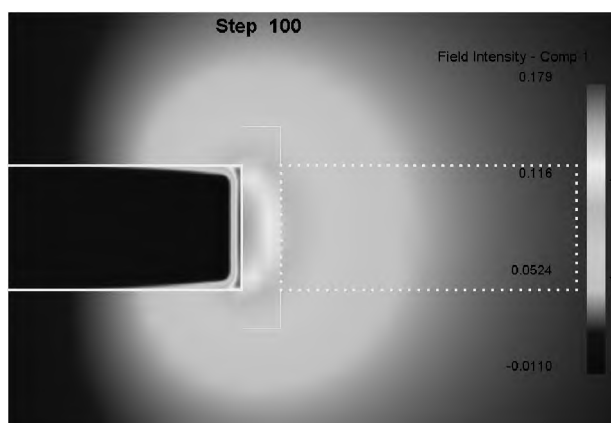
**Рис. 9** Расчетные зависимости твердости (вертикальная шкала) по глубине образца (радиус) для  $\alpha = 0,2$  – кривая со значениями в виде треугольников,  $\alpha = 2$  – кривая со значениями в виде ромбов,  $\alpha = 40$  – кривая со значениями в виде квадратов.

Как видно из рис. 9, разница охлаждения быстродвижущимся потоком воды и водяным душем - незначительная. Однако на практике, реализовать охлаждение быстродвижущимся потоком воды для сложной геометрии кольца гораздо сложнее вследствие турбулентности, возникновения зон, замедления течения жидкости, необходимости регулярно «сбивать паровую рубашку». Для оценки влияния краевого эффекта на режимы нагрева было проведено моделирование индукционного нагрева и закалки коротких образцов

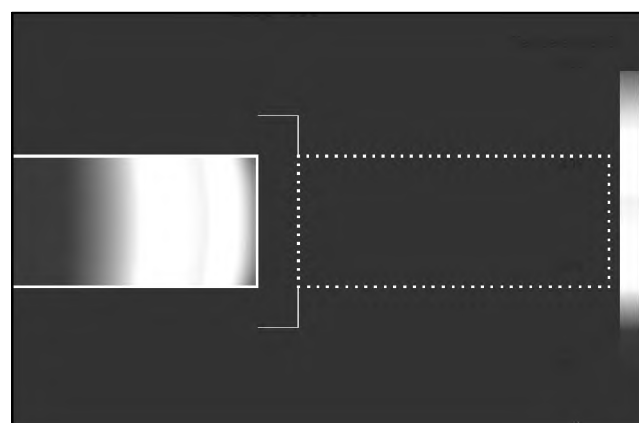
(высота индуктора порядка высоты заготовки), для чего использовалась следующая расчётная схема: материал образца – подшипниковая сталь ШХ4; диаметр образца — 30 мм; высота образца 8 мм; высота индуктора 8 мм; частота тока 66 кГц; прикладываемая мощность 1,3 кВт; время нагрева 4 секунды. Задача также решалась в осесимметричной постановке. КЭ-сетка в зоне индуктора была на порядок мельче. Индуктор на рисунках обозначен пунктиром. На рис. 10 и 11 приведено распределение электрического поля и поля температур соответственно после 2-х сек, а на рис. 12 и 13 – после 4-х сек. Численные эксперименты (как, впрочем, и натурные) качественно и количественно продемонстрировали, что при отсутствии



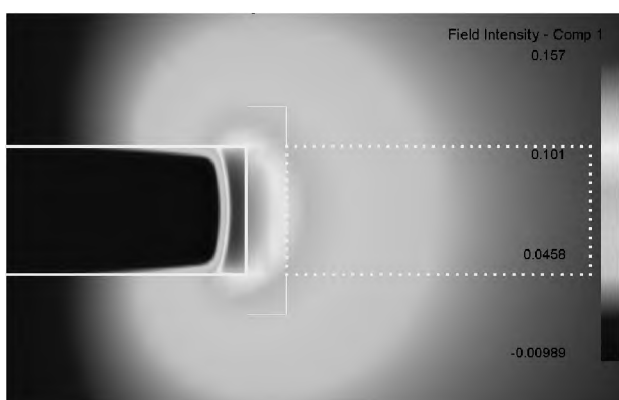
концентраторов магнитного поля значительная часть энергии (до 70% в случае длинномерных образцов! – см. рис. 4, б) паразитно расходуется вне зоны закалки (на разогрев прилегающего материала). Для оптимизации применения ферритных вставок использовалась расчетная схема, содержащая два экранирующих элемента. Параметры расчетной схемы: материал образца - подшипниковая сталь ШХ4; диаметр образца - 30 мм; высота образца 120 мм; высота индуктора - 8 мм; частота тока - 66 кГц; мощность - 5 кВт; время нагрева - 20 сек; 2 экранирующих элемента (также показаны пунктиром) толщиной 15 мм и шириной 20 мм с расстоянием от индуктора до экрана 3 мм, до детали 1 мм, материал — феррит.



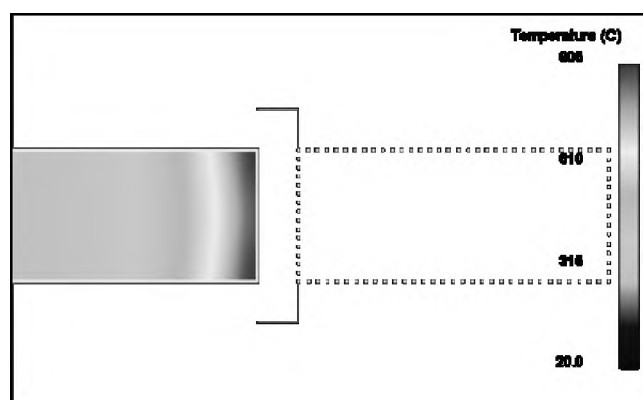
**Рис. 10** Распределение электрического поля и поля температур соответственно после 2-х сек



**Рис. 11** распределение электрического поля и поля температур соответственно после 2-х сек



**Рис. 12** Распределение электрического поля и поля температур соответственно после 4-х сек

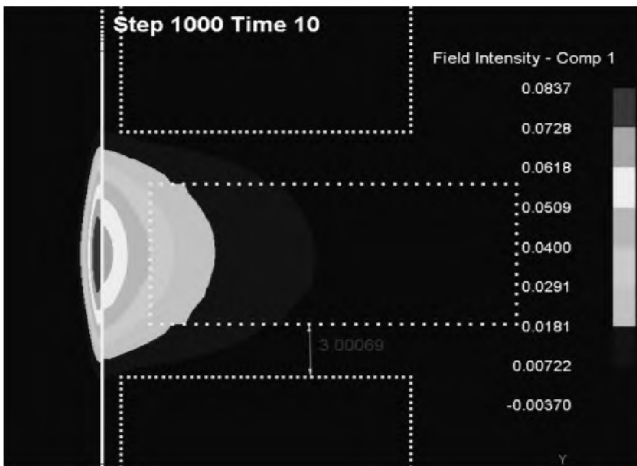


**Рис. 13** Распределение электрического поля и поля температур соответственно после 4-х сек

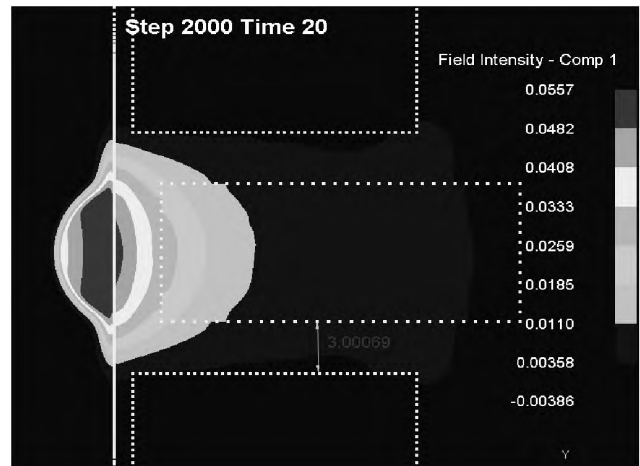
На рис. 14 и 15 приведено распределение электрического поля через 10 и 20 сек. соответственно. Как видно из сравнения этих рисунков с рисунками 4 и 6 - ферритовые экраны сыграли свою роль в локализации электромагнитной энергии.

На рис. 16 приведено температурное поле через 20 сек. На рис. 17 приведено расчетное распределение остаточной доли аустенита.

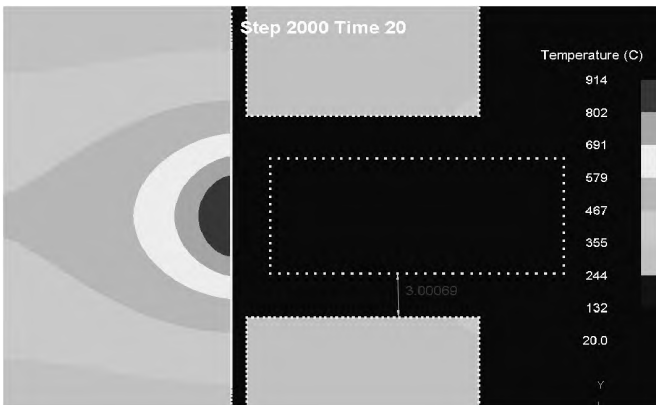
Проведенные расчеты позволили «настроить» КЭ-модели на применяемый материал, понять влияние различных факторов на картину индукционной закалки и сэкономить ресурсы перед моделированием и оптимизацией режимов закалки колец касетных подшипников, что является главной задачей работы.



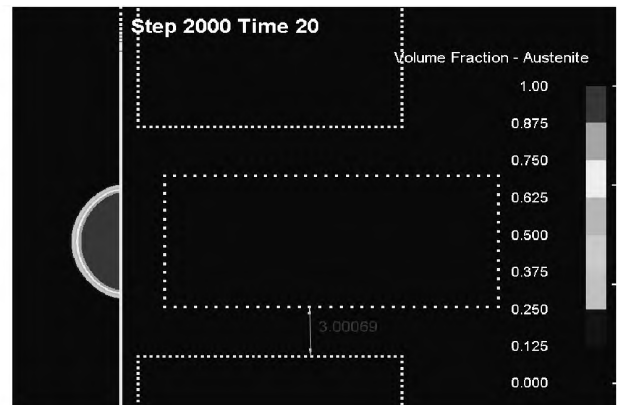
**Рис. 14** Распределение электрического поля через 10 сек



**Рис. 15** Распределение электрического поля через 20 сек



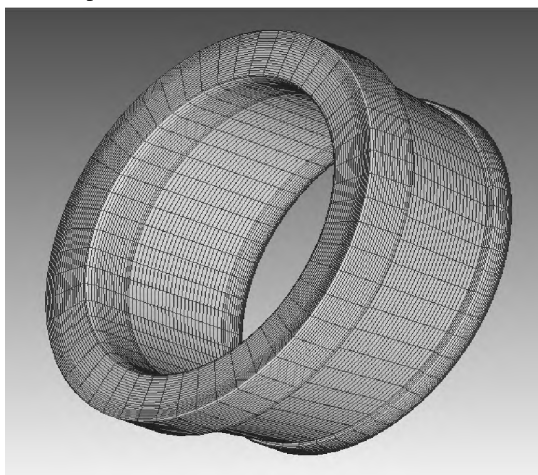
**Рис. 16** Распределение температурного поля через 20 сек



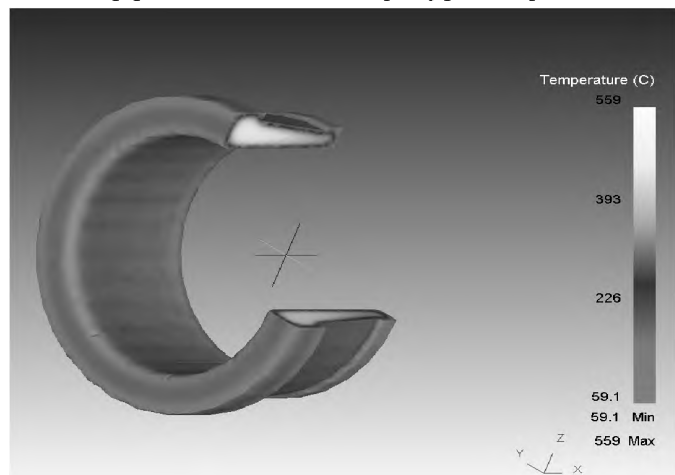
**Рис. 17** Расчетное распределение остаточной доли аустенита

### 3.2. *Индукционная закалка внутренних колец.*

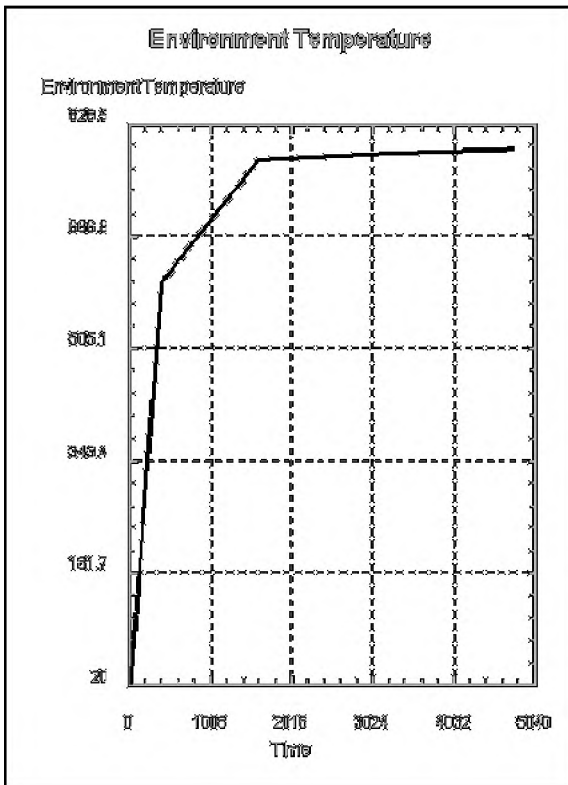
Рассматривается внутреннее кольцо кассетного подшипника ТВУ 150×250 (ТВУ 1520 HARP), геометрия которого представлена на рис. 18. На рис. 19 представлена картина разогрева кольца в обычной печи с графиком температуры воздуха в печи по времени, приведенном на рис. 20 и зависимостью конвекционного коэффициента от температуры на рис. 21.



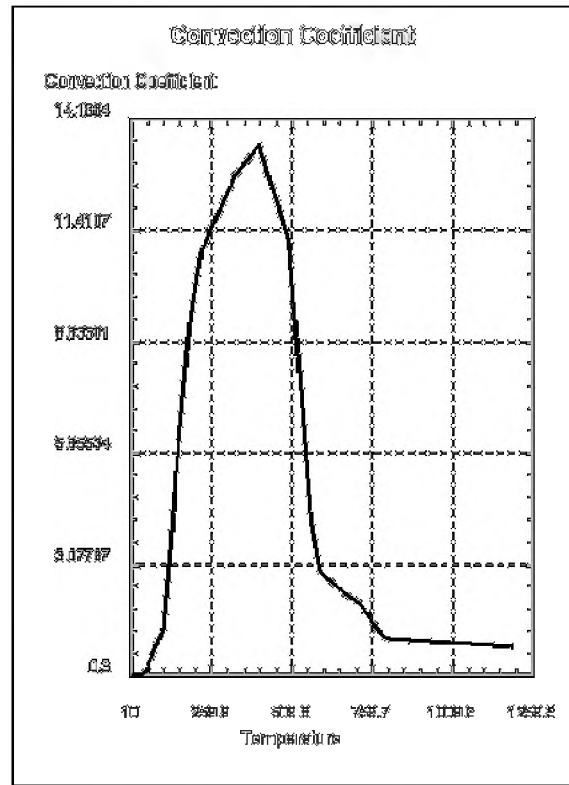
**Рис. 18** Геометрия внутреннего кольца кассетного подшипника ТВУ 150×250



**Рис. 19** Разогрев внутреннего кольца кассетного подшипника ТВУ 150×250 в обычной печи

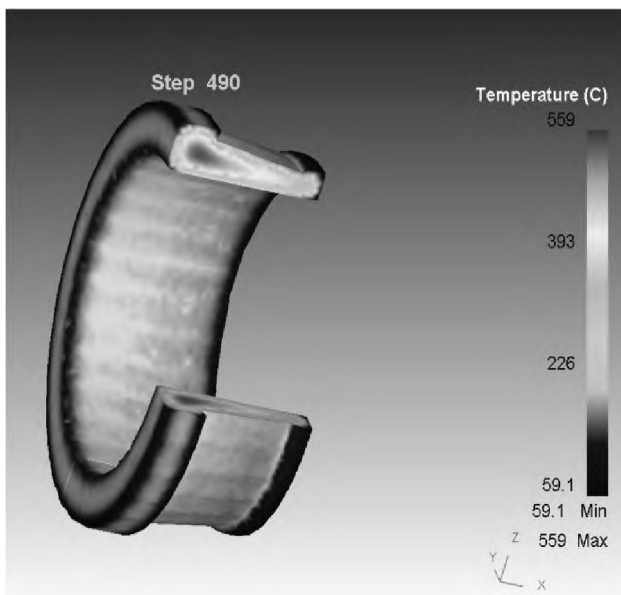


**Рис. 20** Зависимость температуры воздуха в печи от времени

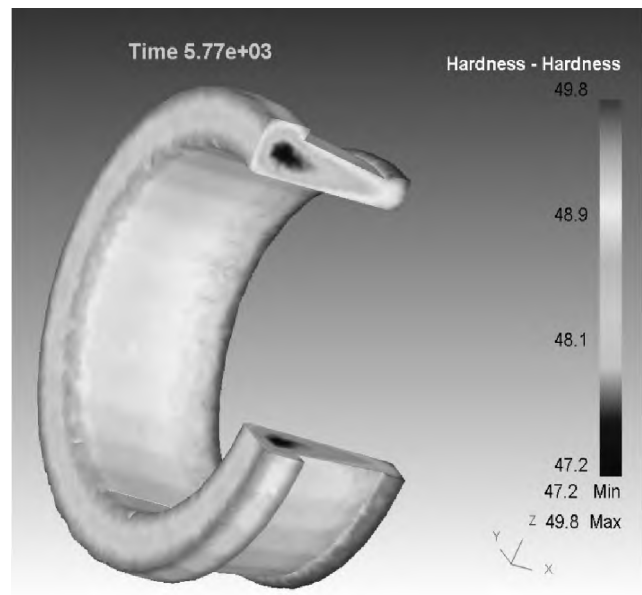


**Рис. 21** Зависимость конвекционного коэффициента от температуры

Расчеты выполнялись для колец из подшипниковых сталей ШХ 4 и ШХ 15 с закалочным охлаждением в течение 10 минут ламинарным потоком воды скоростью 0,1 м/сек и температурой 30<sup>0</sup>С. На рис. 22 и 23 приведено поле температур и распределение твердости перед окончанием закалки.

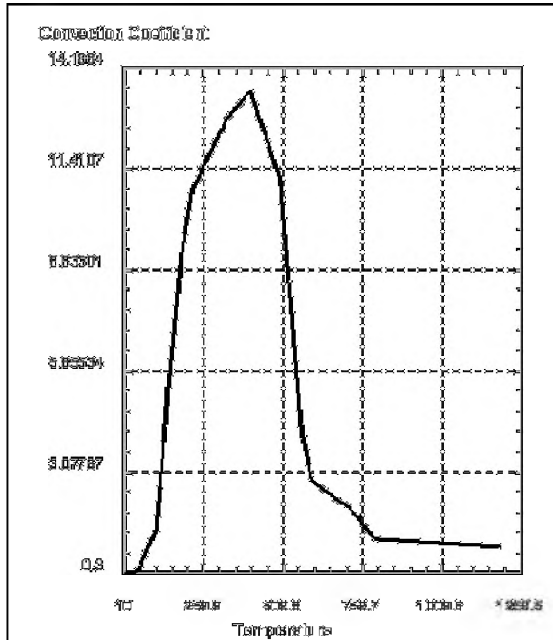


**Рис. 22** Поле температур перед окончанием закалки

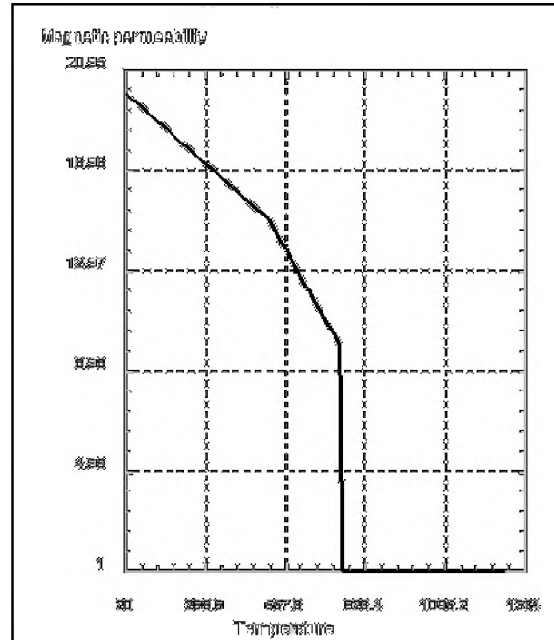


**Рис. 23** Распределение твердости перед окончанием закалки

Ниже приведены результаты моделирования объемной индукционной закалки внутреннего кольца с частотой тока 2,5 КГц, временем разогрева 200 сек, мощностью установки в 300 кВт, и зависимостью электрического сопротивления и магнитной проницаемости в соответствии с рис. 24 и 25.

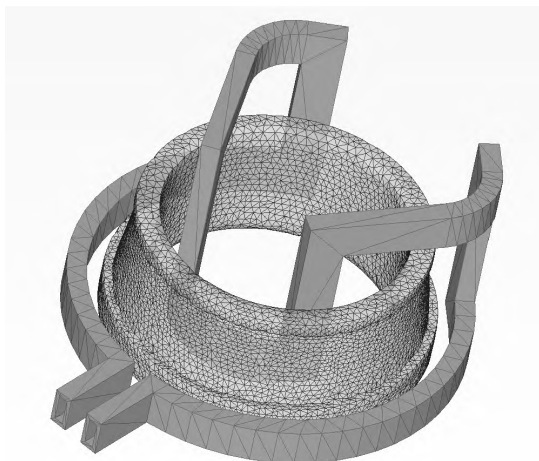


**Рис. 24** Результаты моделирования объемной индукционной закалки в зависимости от электрического сопротивления

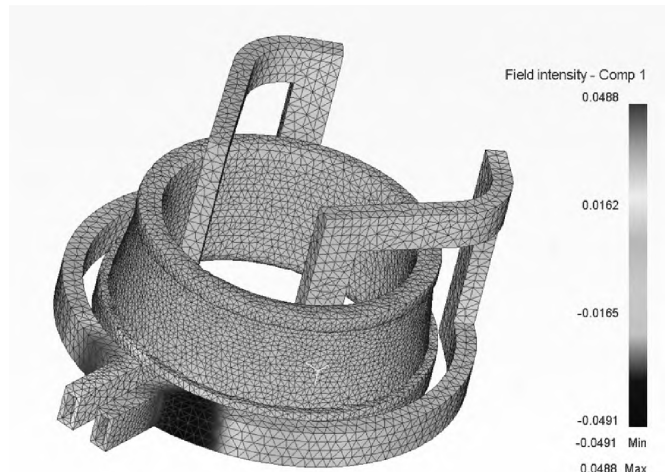


**Рис. 25** Результаты моделирования объемной индукционной закалки в зависимости от магнитной проницаемости

На рис. 26 показана конечно-элементная модель кольца в индукторе, а на рис. – 27 распределение электрического поля.

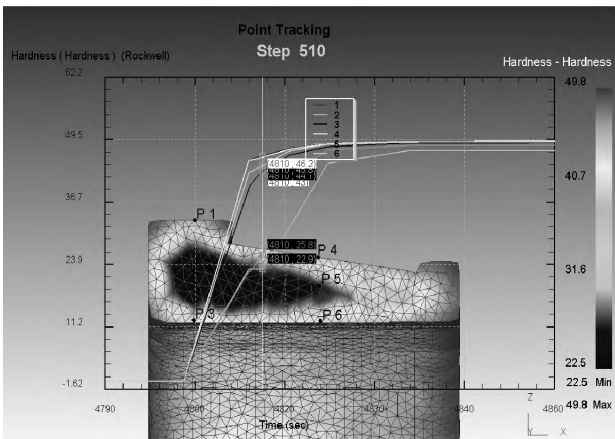


**Рис. 26** Конечно-элементная модель кольца в индукторе

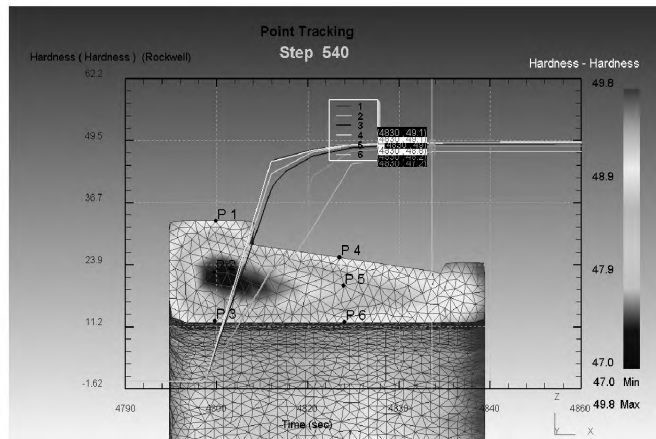


**Рис. 27** Распределение электрического поля

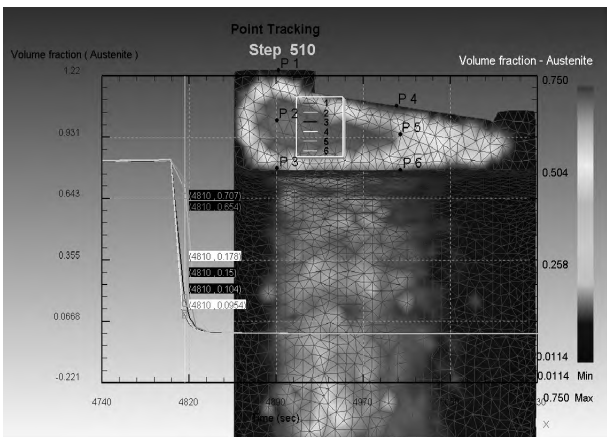
На рис. 28 и 29 приведено для примера расчетное распределение твердости после первых 10 и 30 секунд остывания в масле. На рис. 30 и 31 – картины распределения объемной доли аустенита, а на рис. 32 и 33 – объемной доли мартенсита в те же моменты времени.



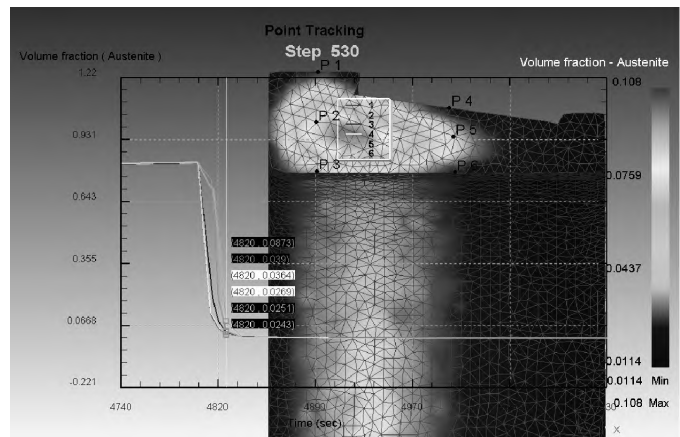
**Рис. 28** Расчетное распределение твердости после первых 10 и 30 секунд остывания в масле



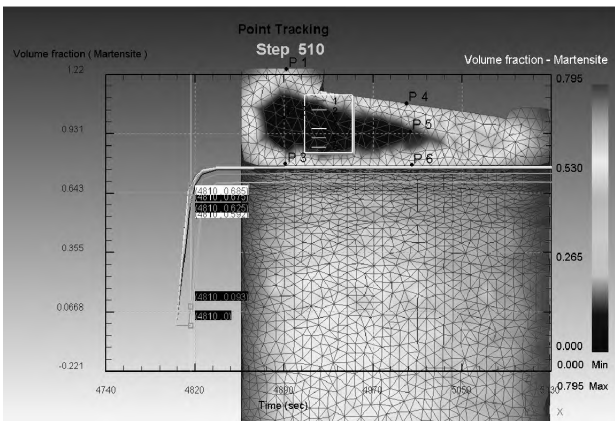
**Рис. 29** Расчетное распределение твердости после первых 10 и 30 секунд остывания в масле



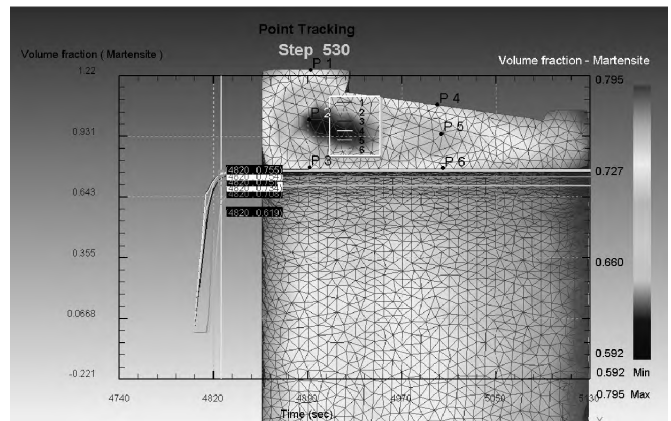
**Рис. 30** Распределение объемной доли аустенита после первых 10 и 30 секунд остывания в масле



**Рис. 31** Распределение объемной доли аустенита после первых 10 и 30 секунд остывания в масле

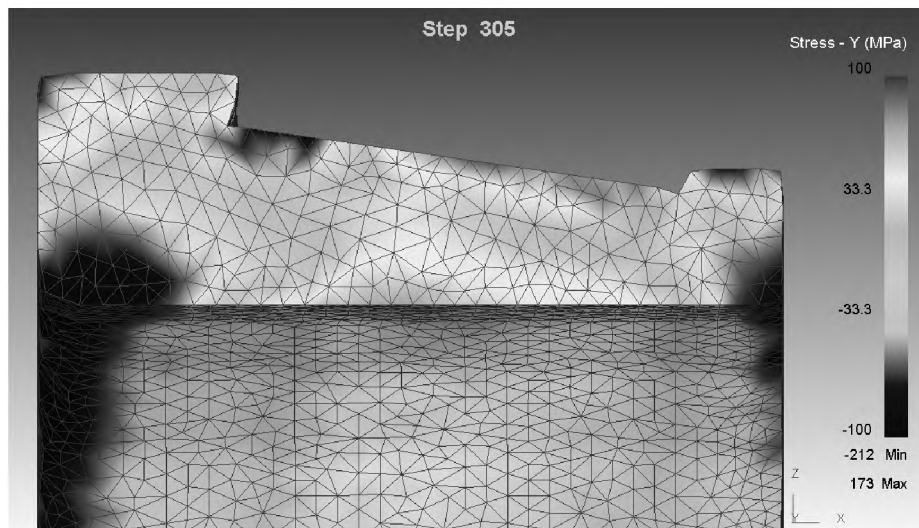


**Рис. 32** Распределение объемной доли аустенита объемной доли мартенсита после первых 10 и 30 секунд остывания в масле



**Рис. 33** Распределение объемной доли аустенита объемной доли мартенсита после первых 10 и 30 секунд остывания в масле

Чрезвычайно важной для качества закалки является появление на дорожке качения сжимающих остаточных напряжений, которые даже в случае появления эксплуатационного износа или зарождения трещины не дают ей развиваться, блокируя в начале появления. На рис. 34 показано начало образования остаточных напряжений на той же 30-й секунде.



**Рис. 34** Начало образования остаточных напряжений на 30-й секунде

Окончательные режимы закалки (форма индуктора, частота, мощность тока и длительность нагрева, параметры охлаждения – всего 7 параметров) были найдены методом Нелдера Мида и реализованы в производстве ХАРП.

### 3.3. Индукционная закалка двухрядных наружных колец

Как уже было сказано, коническая геометрия наружного кольца (см. рис. 35), да еще и осложненная конструктивными «выточками» с тонким (до 6 мм) кончиком на торце кольца, оставляют очень мало шансов на получение нужной картины распределения твердости по сечению кольца одноэтапным процессом объемной / объемно-поверхностной закалки. Реалистично приходится говорить о многоэтапном процессе, в котором вначале предварительной термообработкой всему объему кольца обеспечивается необходимая для «сердцевины» твердость ( $\leq 45$  HRC), а затем токами достаточно высокой частоты проводится поверхностная закалка тех или иных участков наружной и внутренней поверхности кольца (а также торцевой поверхности, на которой согласно руководящей документации происходит проверка твердости). Логичку моделирования и оптимизации режимов закалки продемонстрируем на примере поверхностной закалки наружного диаметра. На первом этапе варьировалось распределение плотности тепловой энергии, необходимое для получения равномерной поверхностной закалки. На втором – оптимизировалась форма индуктора, обеспечивающая необходимое распределение плотности энергии.

Наружная поверхность была разбита на 8 зон (с учетом симметрии на рис. 36 показаны 4 зоны на половине сечения), на которых варьировалось значение плотности тепловой энергии  $Q$ . Таким образом, в этом примере варьировалось 4 значения плотности энергии и длительность разогрева. Оптимизация велась модифицированным методом Нелдера Мида. Ниже приведены результаты для одной из близких к оптимуму итераций:

1-я зона нагрева ( $L_1 = 13,5$  мм),  $Q_1 = 1.500$  Н·мм/сек;

2-я зона нагрева ( $L_2 = 13$  мм),  $Q_2 = 2.300$  Н·мм/сек;

3-я зона нагрева ( $L_3 = 38,5$  мм),  $Q_3 = 2.650$  Н·мм/сек;

4-я зона нагрева ( $L_4 = 35$  мм),  $Q_4 = 2.800$  Н·мм/сек;

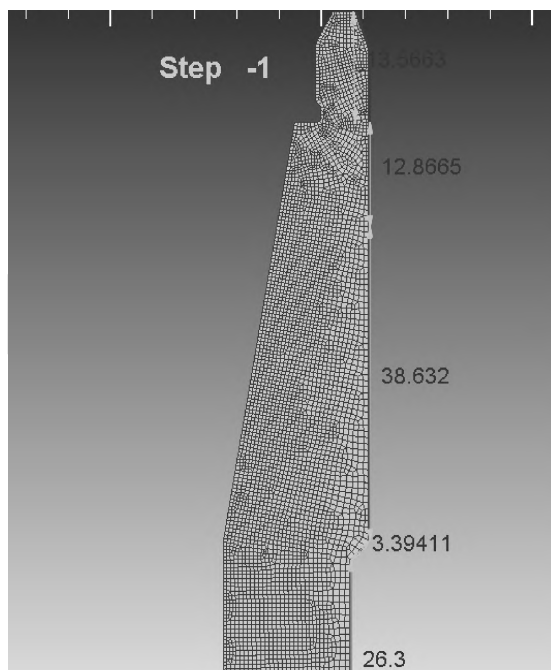
Общая передаваемая мощность составила 318 кВт.

Общее время нагрева = 18 сек.

Равномерная зона перехода материала в 100% аустенит по наружной поверхности на глубину около 2мм составила 14,5 секунд.

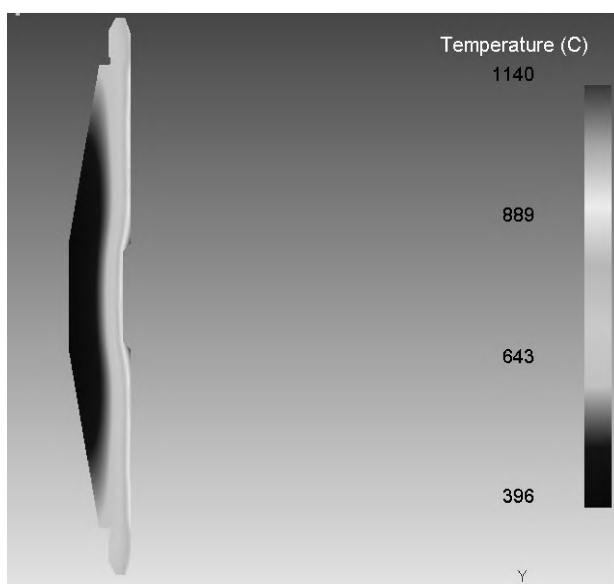


**Рис. 35** Коническая геометрия  
наружного кольца

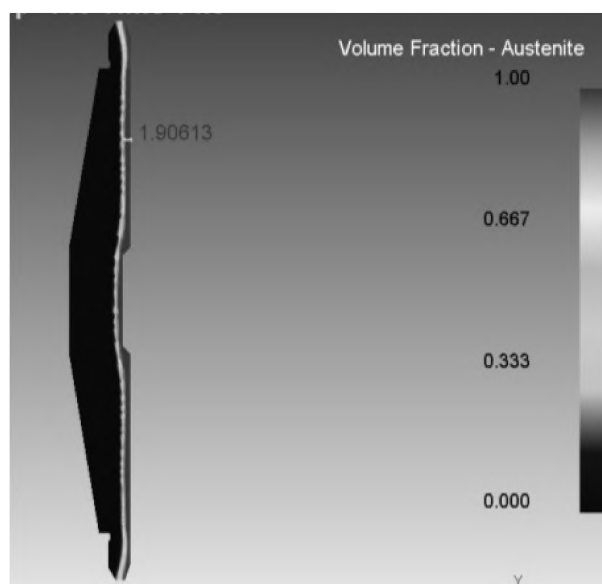


**Рис. 36** Наружная поверхность  
4 зоны на половине сечения

На рисунках приведены соответственно – распределение температур (рис. 37) и распределение объемной доли аустенита (рис. 38) на 14,5-й секунде.

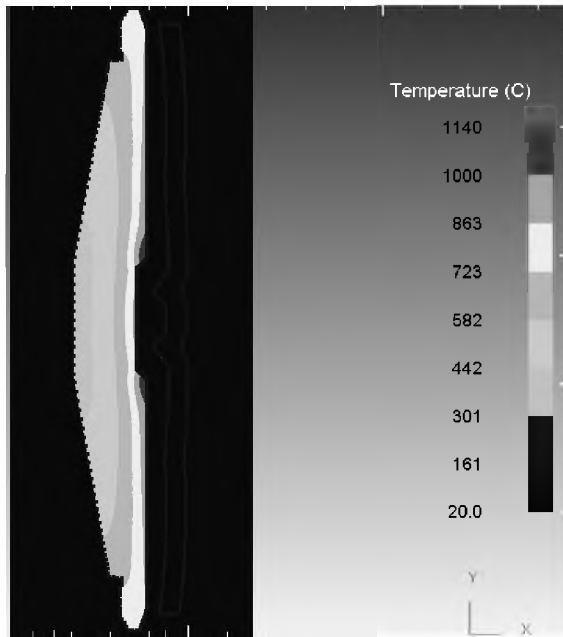


**Рис. 37** Распределение температур

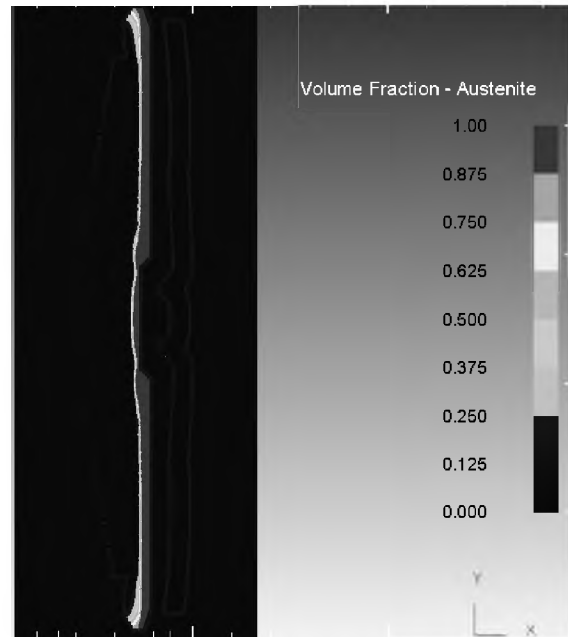


**Рис. 38** Распределение объемной доли аустенита

На втором этапе оптимизировалась форма индуктора, которая обеспечит аналогичный результат. С учетом симметрии варьировались 9 координат, определяющие интерполяцией форму индуктора. Ниже приведены результаты оптимизации вместе с результатами моделирования процесса (распределение температур – на рис. 39 и распределение объемной доли аустенита на рис. 40). Контурно видна полученная форма индуктора.



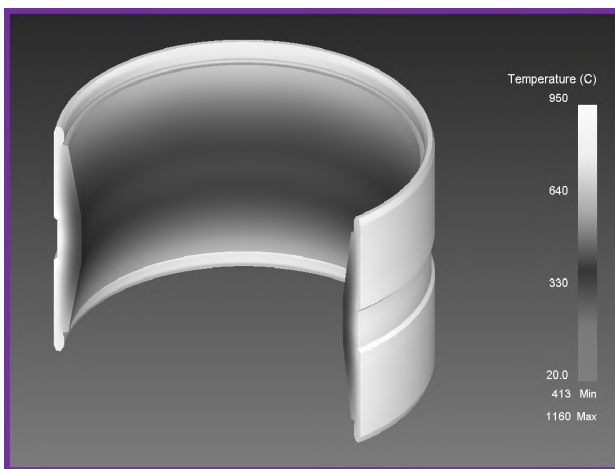
**Рис. 39** Распределение температур



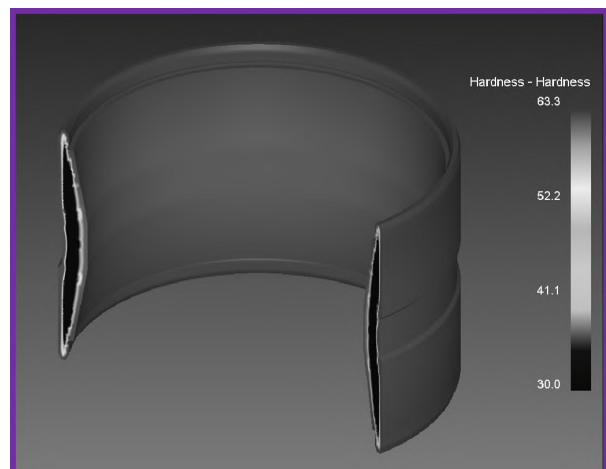
**Рис. 40** Распределение объемной доли аустенита

В аналогичной последовательности решалась задача для внутренней поверхности кольца. На рис. 41 приведено распределение температур при разогреве кольца внутренним индуктором перед охлаждением водяным душем.

В конечном счете, теоретически авторам удалось добиться поверхностной закалки на дорожках качения и на внешней цилиндрической части поверхности наружного кольца с твердостью, не выходящей за пределы  $59,5 < \text{HRC} < 63,3$  и глубиной закаленного слоя, не выходящей за рамки [1,7мм – 2,5мм], как это показано на рис. 42. Необходимые для этого режимы были запатентованы в Украине и РФ (основных странах колеи 1520) [10,11,12]. Точные значения режимов закалки для колец из подшипниковой стали ШХ 4 являются коммерческой тайной, переданной авторами в собственность Группы «УПЭК». Одним из ведущих производителей индукционных закалочных станков по этим данным был создан закалочный автомат, на котором получен результат, приведенный на рис. 43.



**Рис. 41** Распределение температур при разогреве кольца внутренним индуктором перед охлаждением водяным душем



**Рис. 42** Распределение твердости при разогреве кольца внутренним индуктором перед охлаждением водяным душем





**Рис. 43** Модель, полученная в закалочном автомате.

### **Выводы.**

Разработана математическая мульти-физическая модель, состоящая из взаимосвязанных уравнений электромагнитного поля Максвелла и уравнений теплопроводности Фурье с соответствующими граничными условиями, дополненная соотношениями, моделирующими превращение микроструктуры стали из одного состояния в другое в процессе термообработки.

Математическая модель верифицирована на тестовых задачах, а также «настроена на подшипниковую сталь» (по результатам решения тестовых задач идентифицированы недостающие характеристики стали).

Решены задачи моделирования одношаговой объемной закалки внутреннего кольца и трех-этапной объемно-поверхностной закалки наружного кассетного подшипника с оптимизацией режимов закалки исходя из условий обеспечения твердости на поверхности  $59 < \text{HRC} < 63$  (с глубиной слоя  $s > 2$  мм) и в ядре заготовки -  $\text{HRC} < 45$  с достижением минимума потребляемой энергии.

### **Список использованных источников:**

1. Liu H. FEM Simulation of Induction Hardening Process / H. Liu // Master's Degree Thesis. – Sweden, 2013. – Pp. 63
2. Luo R. Simulation of induction quenching process and verification of finite element model / R. Luo // Transactions on Modelling and Simulation. – 1999. – Vol. 22. – Pp. 651 – 659.
3. Zabett A. Simulation of induction tempering process of carbon steel using final elements method / A. Zabett, S.Mohamadi Azghandi // Materials & Design. – 2012. – Vol 36. – Pp. 412 – 419.
4. FEM Simulation of induction hardening: from the generator behavior to the quenched microstructure prediction. Comparison of experiments vs simulations / V. Lejay, J. Barlier, T. Fabro [et al.] // Proceeding of 24th IFHTSE CONGRESS 2017 European Conference on Heat Treatment and Surface Engineering. – Pp. 18–21.
5. Simulation and experimental studies of induction hardening behavior of a new medium-carbon, low-alloy wear resistance steel / V. Javaheri, J.-I. Asperheim, B. Grande [et. al.] // Proceeding of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources. – Pp. 1–6.
6. FEM Modeling of Induction Hardening Processes in Steel / J. Yuan, J. Kang, Y. Rong [et al.] // Mechanical Engineering Faculty Publications. – 2003. – Vol. 12. – Pp. 589–596.
7. P.Carlone. Surface Induction Hardening of Steels: Process Modelling and Numerical Simulation / F.Tucci, V.Esperto, F.Rubino [et al.] // Key Materials. – 2019. – Vol. 813. – Pp 399 – 403.
8. Landek D. Computer simulation of induction surface hardening axially symmetric workpieces / D. Landek, F. Cajner, T. Filetin // Journal de Physique IV France. – 2004. – Vol. 120. – Pp 499–506.
9. Spezzapria M. Multiphysical Finite Element Simulation of Contour Induction Hardening of Gears / M. Spezzapria. – Padova, University of Padova, 2016. – 164 p.

10. Пат. України на корисну модель №66780, МПК (2011.01) C21D 9/00. Спосіб гартування кілець підшипника кочення / Гіршфельд А. М., Сімсон Е. А., Прево І. Д., Проценко Ю. В. – № u201113231; заявл. 09.11.2011; опубл. 10.01.2012. – Бюл.№ 1, 2012 р.

11. Пат. України на корисну модель №102420, МПК (2015.01) F16C 19/00. Підшипниковий вузол роздавальної коробки / Семикін С. І., Сімсон Е. А., Тараник З. С. – № u201504718; заявл. 15.05.2015; опубл. 26.10.2015. – Бюл.№ 20, 2015 р.

12. Пат. 2493269 Российская Федерация, МПК (2006.01) C21D 9/40, C21D 1/42, C22C 38/20, F16C 33/64, F16C 33/32. Способ закалки колец подшипника качения и подшипник качения / Гиршфельд А. М., Симсон Э. А., Прево И. Д., Проценко Ю. В.; заявитель и патентообладатель Частное акционерное общество "У.П.Э.К." (UA). – №2011150610/02; заявл. 20.06.2013; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 3 с.

### References

1. Liu, H 2013, 'FEM Simulation of Induction Hardening Process', *Masters Degree Thesis*, Sweden, pp. 63.
2. Luo, R 1999, 'Simulation of induction quenching process and verification of finite element model', *Transactions on Modelling and Simulation*, vol. 22, pp. 651- 659.
3. Zabeti, A & Mohamadi Azghandi, S 2012, 'Simulation of induction tempering process of carbon steel using final elements method', *Materials & Design*, vol. 36, pp. 412 – 419.
4. Lejay, V, Barlier, J, Fabro, T et al. 2017, 'FEM Simulation of induction hardening: from the generator behavior to the quenched microstructure prediction. Comparison of experiments vs simulations', *Proceeding of 24th IFHTSE CONGRESS 2017 European Conference on Heat Treatment and Surface Engineering*, pp. 18-21.
5. Javaheri, V, Asperheim, JI, Grande, B et. al. n.d., 'Simulation and experimental studies of induction hardening behavior of a new medium-carbon, low-alloy wear resistance steel', *Proceeding of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources*, pp. 1-6.
6. Yuan, J, Kang, J, Rong, Y et al. 2003, FEM Modeling of Induction Hardening Processes in Steel, *Mechanical Engineering Faculty Publications*, vol. 12, pp. 589-596.
7. Carlone, P, Tucci, F, Esperto, V, Rubino, F et al. 2019, 'Surface Induction Hardening of Steels: Process Modelling and Numerical Simulation', *Key Materials*, vol. 813, pp 399-403.
8. Landek, D, Cajner, F & Filetin, T 2004, 'Computer simulation of induction surface hardening axially symmetric workpieces', *Journal de Physique IV France*, vol. 120, pp 499-506.
9. Spezzapria, M 2016, *Multiphysical Finite Element Simulation of Contour Induction Hardening of Gears*, University of Padova, Padova.
10. Girschfeld, AM, Simson, EA, Prevo, ID, Protsenko, YuV, 2012, Sposib hartuvannia kilets pidshyynyka kochennia, UA Patent 66780.
11. Semikin, SI, Simson, EA, Taranyk, ZS, 2015, Pidshyynykovyi vuzol rozdavalnoi korobky, UA Patent 102420.
12. Girschfeld, AM, Simson, EA, Prevo, ID, Protsenko, YuV, 2013, Sposob zakalki kolec podshipnika kacheniya i podshipnik kacheniya, RU Patent 2493269.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2019 г.