

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Д.И. Булан, И.И. Вегера, А.В. Польшаев, П.Ю. Цыкунов

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

*Исследованы особенности математического моделирования нагрева под закалку внутренней поверхности заготовок внешним электромагнитным полем с использованием индукторов различной формы, оснащенных магнитопроводом. Установлены оптимальные режимы нагрева заготовок различной номенклатуры.*

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, математическое моделирование, магнитопровод, внешнее электромагнитное поле

## MODELING THE HEATING OF BLANKS BY AN EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

D. I. Bulan, I. I. Vegera, A. V. Polysaev, P. Y. Tsykunou

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

*The peculiarities of mathematical modeling of heating for quenching the inner surface of blanks by an external electromagnetic field using inductors, equipped with a magnetic core are studied. Optimal modes of heating of blanks of various nomenclature are established.*

**Keywords:** induction heating, mathematical modeling, magnetic circuit, external electromagnetic field

**E-mail:** zamaranthz@mail.ru

### Введение

Индукционный нагрев внутренних цилиндрических поверхностей осуществляется внешним электромагнитным полем индуктора. С точки зрения расчетов, моделирования и практической реализации, данный тип нагрева значительно сложнее любых внешних замкнутых поверхностей. При нагреве внешней поверхности деталь находится внутри индуктора, в зоне сильного магнитного поля. Из-за кольцевого эффекта и эффекта близости индуцированный ток сконцентрирован в зоне, немного меньшей, чем ширина индуктора. При нагреве отверстий магнитный поток замыкается в зоне сильного магнитного поля внутри индуктора, что приводит к росту сопротивления обратного замыкания и росту потерь энергии индуктора [1]. Снижается магнитный по-

ток, величина магнитной индукции, а вследствие и плотность тока в зоне нагрева. Что в свою очередь уменьшает тепловыделение в детали.

При нагреве внешним полем применяются магнитопроводы с целью компенсации кольцевого эффекта и «выдавливания» магнитного поля наружу. Магнитопровод – тело, обладающее большой магнитной проницаемостью, которое применяют в практике индукционного нагрева для перераспределения магнитных полей индуктирующего провода. В качестве магнитопровода применяются магнитомягкие материалы. К ним относятся в первую очередь ферриты различного состава (Mn – Zn, Ni – Zn), аморфные металлы (Co, Fe), пермаллои, нанокристаллические механические сплавы. Главной характеристикой таких материалов является магнитная индукция насыщения. Данная величина характеризует «энергоёмкость» материала, т.е. при бесконечном росте напряженности магнитного поля значение магнитной индукции в магнитопроводе не превысит величину, определяемую свойствами материала [2].

Если поместить медный проводник прямоугольного сечения (рис. 1) с переменным током в паз магнитопровода из пластин электротехнического железа, магнитный поток будет стремиться пройти по пути меньшего сопротивления, т. е. по железу, где выше магнитная проницаемость. Соответственно ЭДС самоиндукции и сопротивление току будет больше на участках проводника, прилегающих ко дну паза магнитопровода. На участках, лежащих на поверхности, ЭДС самоиндукции и сопротивление току меньше. Следовательно, произойдет перераспределение плотности тока по сечению проводника, и ток будет стремиться протекать по стороне проводника, не контактирующей с магнитопроводом.

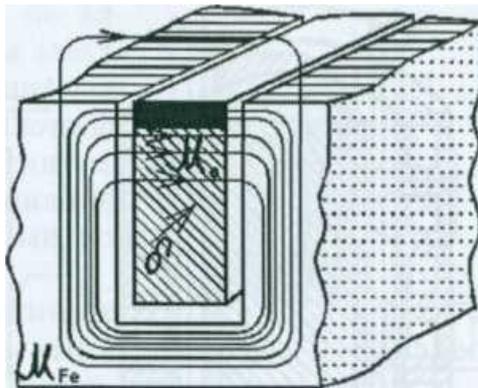


Рис. 1. Распределение тока и поля в проводнике при наличии вокруг его разомкнутого магнитопровода

Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи (магнитопровода) приводит к перераспределению тока по сечению проводника. В индукционном витке, свернутом в виде кольца, можно заставить ток протекать не по внутренней, а по внешней стороне витка, надев на него П-образный магнитопровод, открытой стороной обращенный к внешней части витка.

### Методика и анализ результатов

В зависимости от поставленной задачи индукционной закалки внутренней поверхности стальных заготовок применяются два основных типа индукторов: индуктор типа «гусь» и петлевой индуктор. Первый тип индуктора применяется (рис. 2) применяется для нагрева отверстий в диапазонах 20–40 мм и более 50 мм. В зависимости от диаметра высотка нагрева ограничивается высотой шин индуктора.

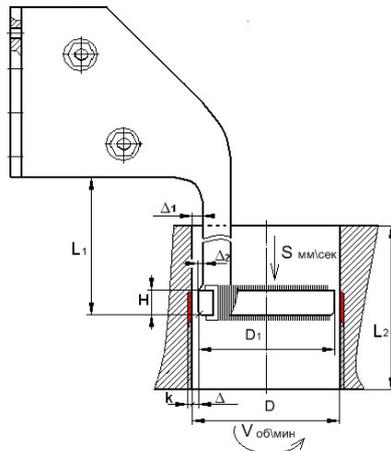


Рис. 2. Одновитковой индукционный виток, совмещенный со спрейером и магнитопроводом для закалки внутренних цилиндрических отверстий в диапазоне размеров 50...250 мм:  
 $D$  – диаметр закаливаемой поверхности;  $D1$  – наружный диаметр индукционного витка;  
 $H$  – высота индукционного витка;  $\Delta$  – зазор между индукционным витком и закаливаемой поверхностью;  $\Delta1$  – зазор между токоподводящими шинами и закаливаемой поверхностью;  
 $\Delta2$  – величина смещения индукционного витка к токоподводящим шинам;  $L1$  – длина токоподводящих шин;  $L2$  – длина закаливаемой поверхности;  $k$  – толщина закаленного слоя

При такой конструкции индуктора закалка отверстий осуществляется непрерывно-последовательным методом. Ключевой особенностью такого метода закалки является эффект «полосатости» из-за перепада температуры по высоте, связанный с автоколебаниями при переходе точки Кюри [3, 4], что в конечном итоге приводит к перепадам твердости закаляемого слоя по высоте. Возможными вариантами решения данной проблемы являются варьирование скорости вращения и перемещение детали, а также увеличение толщины магнитопровода до некоторого предела.

При приближенных расчетах для оценки влияния эффективности использования магнитопровода на интенсивность тепловыделения можно воспользоваться следующими формулами [5]:

Плотность тока под индуктором в данном случае определяется по формуле

$$(J_m^i)^2 = \eta \frac{P_z}{z_i^2 (a_i \Delta_i)^2} \left( \frac{h_{\min}}{h_i} \right), \quad (1)$$

где  $J_m^i$  – плотность тока в  $i$ -той точке детали,  $A/m^2$ ;

$a_i$  –  $i$ -тая полоса нагрева, м;

$z_i$  – полное сопротивление  $i$ -той зоны, Ом;

$h_{\min}$  – минимальный зазор между индуктором и деталью, м;

$h_i$  – текущий воздушный зазор, м;

$\eta$  – электрический КПД;

$\Delta_i$  – глубина проникновения тока в материал загрузки, м.

Конечная формула количества теплоты, выделяемая в зоне нагрева рассчитывается по формуле

$$Q_v^i(\bar{x}, \tau) = \eta \frac{P_z}{z_i^2 (a_i \Delta_i)^2} \left( \frac{h_{\min}}{h_i} \right) \exp\left(-2d \frac{\bar{x}}{\Delta_i}\right). \quad (2)$$

Далее идет тепловой расчет по формуле Фурье с граничными условиями первого рода.

Из формул следует, что параметры магнитопровода оказывают влияние через электрический КПД индуктора путем дополнительной величины сопротивления при использовании метода на основе схем замещения.

Т.к. чрезмерное увеличение толщины башмака магнитопровода приводит к размытию полосы нагрева (рис. 3,4), данный способ не слишком эффективен, в том числе с точки зрения энергоэффективности системы [1, 4]. Это приводит к растеканию величины магнитного потока без увеличения последнего.

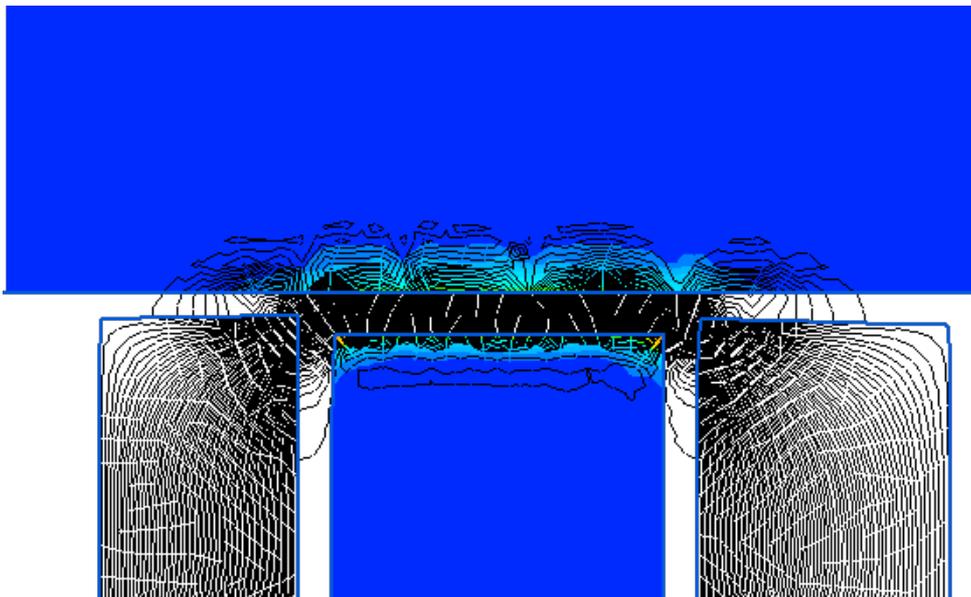


Рис. 3. Иллюстрация эффекта размытия при увеличении ширины магнитопровода

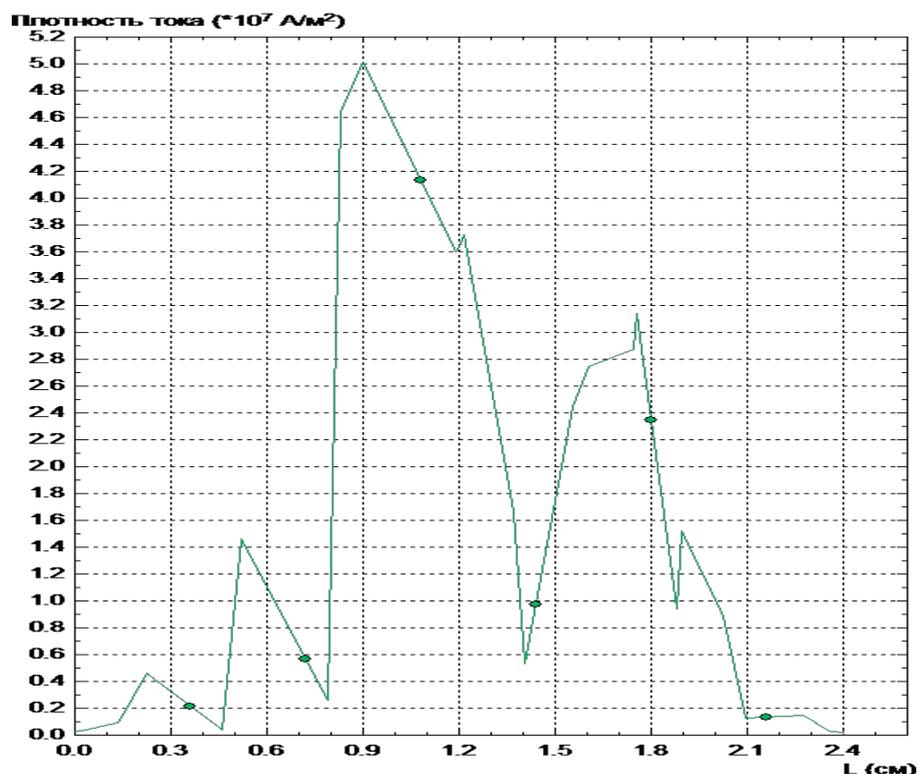


Рис 4. Неравномерность плотности тока при завышенной толщине магнитопровода

Наиболее эффективным является управление скоростью движения детали. При этом важно четко контролировать саму скорость и подбирать ее такой, чтобы выдерживать нужную температуру по сечению на нужной глубине. На рис. 5. представлено температурное поле трубы толщиной 2 см в относительных координатах. Нагрев производился с использованием индуктора «гусь», оснащенный магнитопроводом. С учетом того, что при внутреннем нагреве согласно методу схем замещения сила тока падает в среднем на 40–60 % в сравнении с наружным нагревом за счет потерь на обратное замыкание и магнитопровод [1, 7]. Частота тока индуктора составила 1039 А. Продолжительность нагрева 5 с позволила достичь требуемой температуры нагрева в зоне закалки, а охлаждение напором воды с расчетным коэффициентом теплоотдачи в 10 000 Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

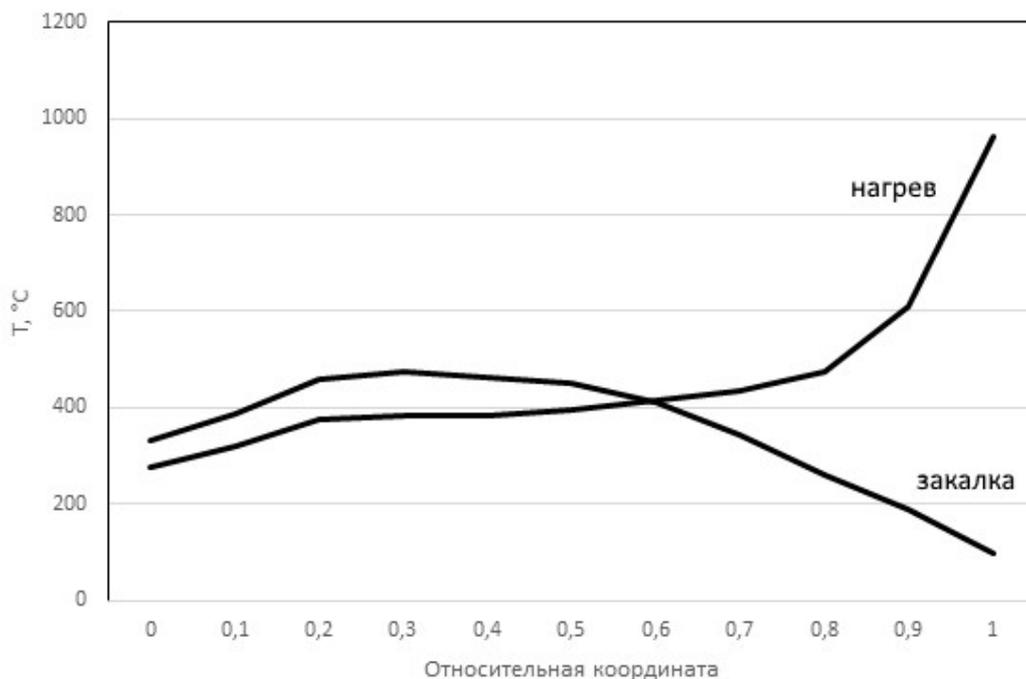


Рис. 5. Неравномерность температурного поля при ступенчатом нагреве

Из расчетов видно, что при охлаждении возникает эффект аккумуляции тепла во внутреннем слое, т.к. тепло, выделяемое за счет вихревых токов в глубине детали, не успевает полностью выйти при охлаждении, повышая температуру внутренних слоев. Вследствие чего наличествует эффект самоотпуска детали. Данный эффект может быть как вредным, так и полезным в зависимости от техпроцесса. Слишком большое количество теплоты в глубине может вызвать разупрочнение закаленного слоя, т.к. скорость распространения тепла напрямую зависит от коэффициента температуропроводности материала детали и температура не успеет снизиться до нужных значений при недостаточной выдержки при охлаждении или слишком большой при нагреве. Температурное поле при непрерывно-последовательной закалке детали диаметром 30 мм и толщиной 20 мм представлено на рис. 6. Сила тока индуктора 1800 А, реальная сила тока 1027 А. Время выдержки на нагрев и закалку 5 с. Важно при этом понимать, что начальная температура заготовки при каждом новом шаге закалки выше начальной из-за рассеяния тепла. Поэтому при расчете второго и последующего шагов, время нагрева снижается (в данном случае до 3,47 с)

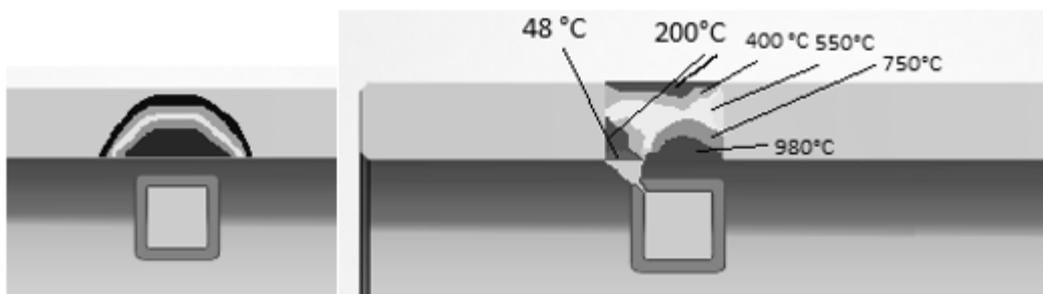


Рис. 6. Расчетное температурное поле при непрерывно-последовательном нагреве и закалке

Второй тип индукторов (петлевой) применяется для закалки отверстий, диаметром 20–100 мм и более, высотой до 100 мм (возможно и более). Преимущество петлевых индукторов заключается в том, что их можно использовать для нагрева отверстий переменного диаметра. Также, в отличие от индукторов типа «гусь», нагрев происходит соосно с отверстием, а не перпендикулярно. Это позволяет уйти от эффекта «улитки» при ступенчатой закалке. Трехмерная модель индуктора представлена на рис. 7. Петля индуктора разделена пластиной магнитопровода для повышения КПД нагрева. В то же время существует важная особенность такого индуктора: на конце индуктора плотность магнитного поля наиболее высока. Соответственно интенсивность нагрева в той зоне выше, что приводит к перегреву и разрушению магнитопровода за счет угловых эффектов [8]. Поэтому использовать такой индуктор следует крайне осторожно.

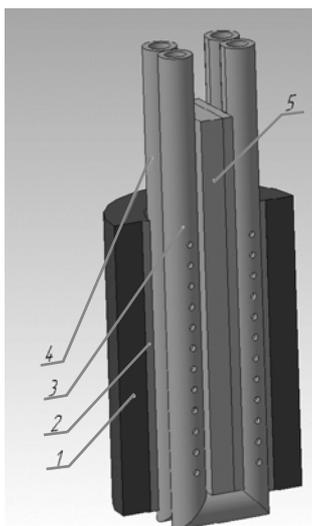
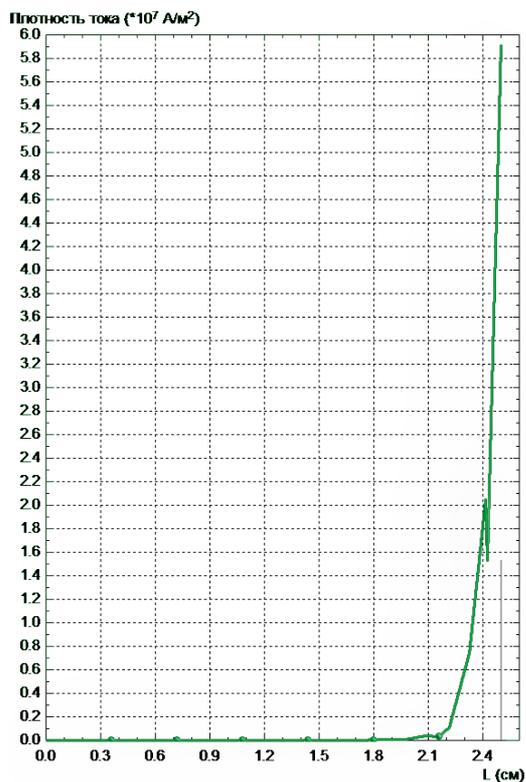


Рис. 7. Петлевой индуктор:

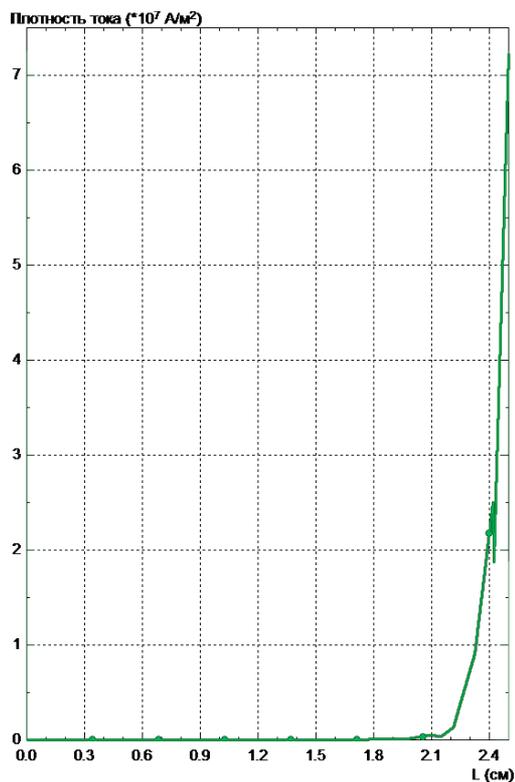
1 – закаливаемая деталь; 2 – слой закалки ТВЧ; 3–4 – индукционные витки; 5 – магнитопровод

В соответствии с конструкцией, закалка (охлаждение) производится в другой плоскости, условно перпендикулярной зоне нагрева. Тогда скорость вращения детали следует подбирать так, чтобы компенсировать падение температуры в условной зоне перехода двух плоскостей. Хотя данный перепад и не особо высок. В остальном нагрев производится аналогично вышеописанному варианту.

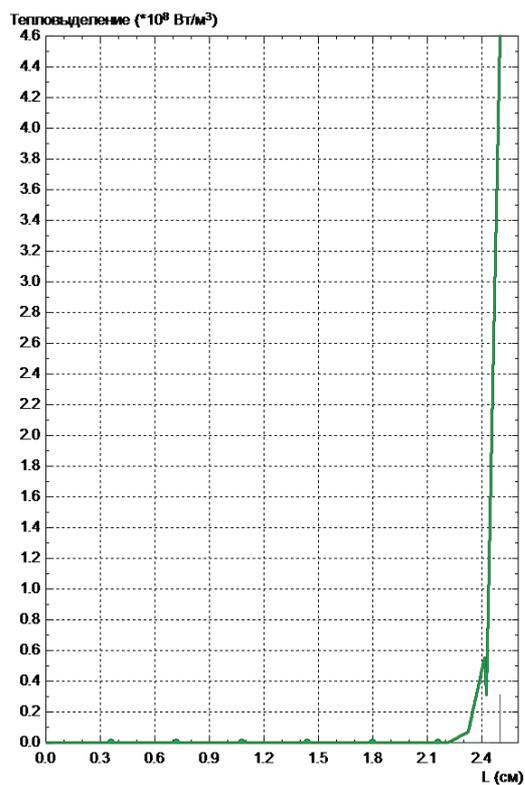
При использовании обоих типов индукторов важно помнить про величину воздушного зазора. Для повышения эффективности тепловыделения в детали зазор должен быть минимальным согласно формуле 2. Причем на высоких частотах отсутствие магнитопровода не является критическим, т.к. магнитный поток в малом зазоре достаточно велик для наведения вихревых токов, достаточных для тепловыделения [8]. На рис. 8 показана плотность тока в слое для закалки внутренней поверхности детали диаметром 5 см.



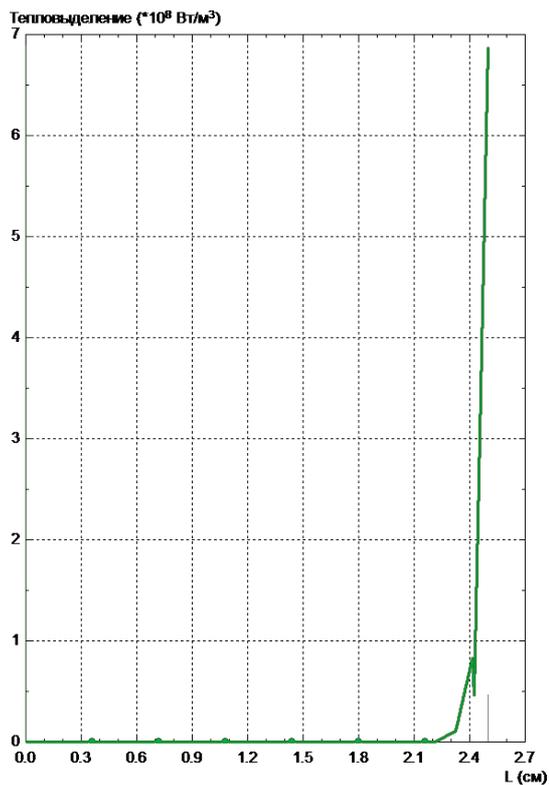
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 8. Зависимости плотности тока и величины тепловыделения в зоне индукционного нагрева внешним полем: *a, в* – без магнитопровода; *б, г* – с магнитопроводом

Очевидно, что наличие магнитопровода (рис. 8, б, г) повышает величину тепловыделения практически на треть, а плотность тока в 1,1 раза (рис. 8, а, в). В данном случае воздушный зазор равномерный и составил 1 мм, что намного больше, чем расстояние между петлями индуктора (3 см). В то же время увеличение зазора до 6 мм приводит к снижению тепловыделения в слое закалки в три раза (рис. 9, б), а снижение плотности тока в десять раз (рис. 9, а). Таким образом, существует геометрическая прогрессия зависимости величины воздушного зазора между деталью и индуктором от величины плотности тока и, следовательно, тепловыделения [9]. В итоге слишком большой воздушный зазор приводит к отсутствию токов в детали (рис. 10).

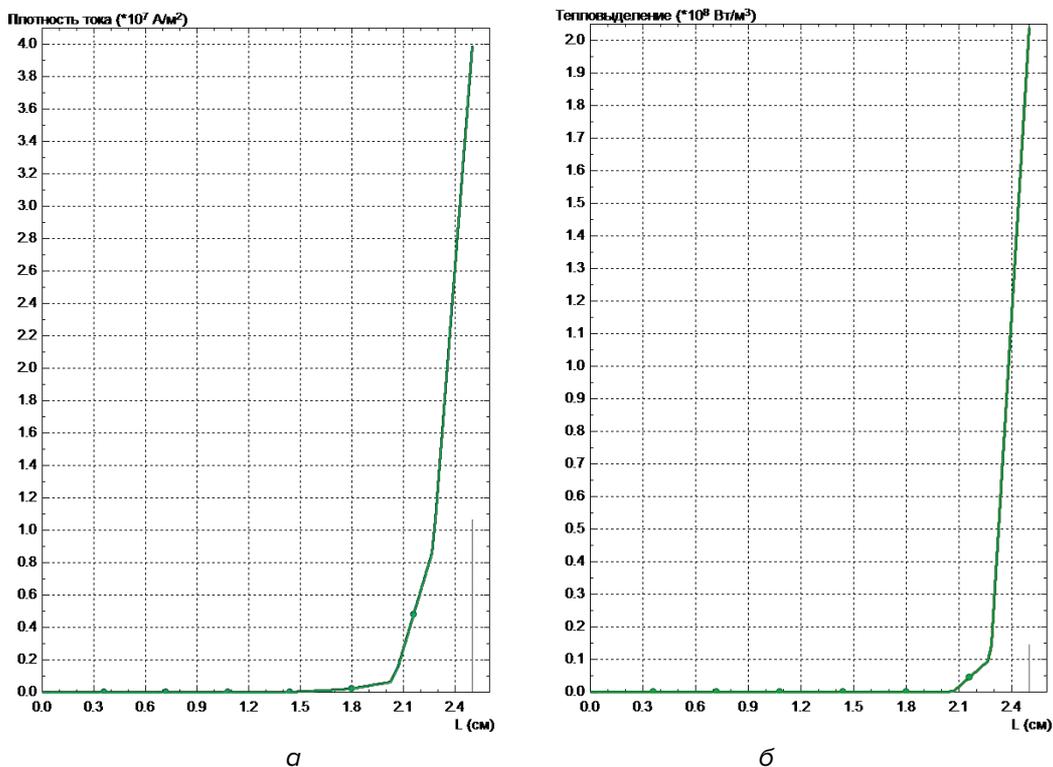


Рис. 9. Плотность тока (а) и тепловыделение (б) в детали при отношении воздушного зазора толщины магнитопровода между витками 0,8 к 1.

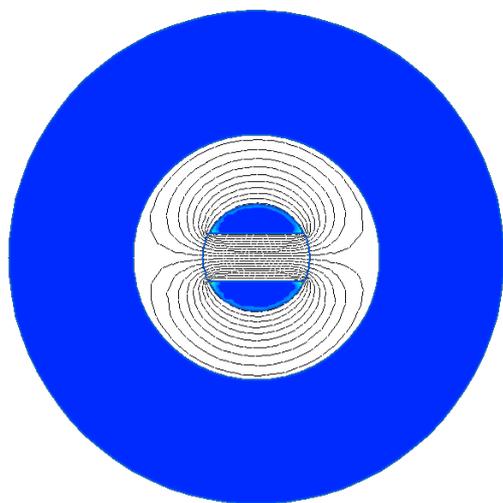


Рис. 10. Магнитные силовые линии при недостаточно малом воздушном зазоре

### Заключение

В результате моделирования и расчетов были подобраны скоростные и энергетические режимы нагрева внутренних отверстий кулаков, диаметром до 100 мм петлевым индуктором. Также выполнены расчеты тепловых полей при непрерывно-последовательном режиме методом конечных разностей с использованием графического отображения массива температур, рассчитанных для первого шага нагрева/закалки. Показаны особенности применения индукторов при внутреннем нагреве с различным воздушным зазором. Величине воздушного зазора следует оказывать наибольшее внимание, особенно при негреве

внешним электромагнитным полем, т.к. она напрямую влияет на интенсивность нагрева и КПД индуктора. Чрезмерное увеличение зазора недопустимо. В этом случае индуктор переходит в режим холостого хода, что повышает энергозатраты, а в некоторых случаях в зависимости от преобразователя частоты – вызода из стоя последнего.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н.А. Павлов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. Стародубцев, Ю. Нанокристаллические магнитомягкие материалы / Ю. Стародубцев, В. Белозёров / Компоненты и технологии. – 2007. – №69. – С. 240–242.
3. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев [и др.] // Индукционный нагрев. – 2013. – №1 (23). – С. 36–41.
4. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлиев [и др.] // Индукционный нагрев, – 2013. – №2 (24). – С. 37–43.
5. Numerical simulation and optimization of heater for induction heating of leading wheel gear // S. Galunin [et al.] // ElConRusNW, Feb. 2015., P. 192–195.
6. Gurchenko, P.S. Mathematical simulation of the temperature field in hardening gears by induction heating under a layer of water // P.S. Gurchenko, M.L. German // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2000. – Vol. 73. – №2. P. 420–427.
7. Smalcerz, A. Mathematical modeling of surface induction heating // A. Smalcerz, J. Wiczorek, M. Slezok // Acta Metallurgica Slovaca. – 2014. – Vol. 20. – No. 2. – P. 152–159.
8. Вегера, И. И. Моделирование и разработка технологии высокочастотного нагрева внутренних отверстий // И. И. Вегера, Д. И. Булан, А. И. Тарарук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. трудов, в 3 кн. Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – 2016. – С. 59–66.
9. Торчинский, В. В. Экспериментальное исследование индукционного нагрева несплошных полых цилиндрических тел с внутренним магнитопроводом / В. В. Торчинский // Электротехнические системы и комплексы. – 2001. – №6. – С. 289–293.

## REFERENCES

1. Slukhotsky A. E., Nemkov V. S., Pavlov N. A. Ustanovki induktsionnogo nagreva [Induction heating plants] / Leningrad, Energoizdat, 1981. – 328 p. (In Russian)
2. Starodubtsev Yu., Belozarov V. Nanocrystalline magnetically soft materials [Nanocrystalline magnetically soft materials]. Components and technologies, 2007, No. 69, pp. 240–242. (In Russian)
3. Dzljev S.V., Zavorotkin A.A., Zhnakin D.M., Pishalev K.E., Perevalov Y.Y. Neustoychivost' pri induktsionnom nagreve magnitnoy stali [Instability in the Induction Heating of Magnetic Steel] Induktsionnyy nagrev, – 2013. – No. 1 (23). – P. 36–41. (In Russian)
4. Dzljev S.V., Zavorotkin A.A., Zhnakin D.M., Pishalev K.E., Perevalov Y.Y. Self-oscillations in scanning induction heating of magnetic steel [Self-oscillations with scanning induction heating of magnetic steel] / Induktsionnyy nagrev, – 2013. – No. 2 (24). – pp. 37–43. (In Russian)
5. Galunin S., Kudryash M., Blinov K., Kozulina T. Numerical simulation and optimization of the heater for induction heating of the leading wheel gear. ElConRusNW, Feb. 2015., pp. 192–195.
6. Gurchenko P.S. Mathematical simulation of the temperature field in hardening gears by induction heating under a layer of water // P.S. Gurchenko, M.L. German // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2000. – Vol. 73. – №2. pp. 420–427.
7. Smalcerz A. Mathematical modeling of surface induction heating // A. Smalcerz, J. Wiczorek, M. Slezok // Acta Metallurgica Slovaca. 2014. Vol. 20. – No. 2. pp. 152–159.
8. Vegera I. I., Bulan D. I., Tararuk A. I. Modelirovaniye i razrabotka tekhnologii vysokochastotnogo nagreva vnutrennikh otverstiy [Modeling and development of technology for high-frequency heating of internal holes]. Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov : sb. nauch. trudov, v 3 kn. Kn. 2: Tekhnologii i oborudovaniye mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki. – 2016. – pp. 59–66.
9. Torchinsky V. V. Eksperimental'noye issledovaniye induktsionnogo nagreva nesploshnykh polykh tsilindricheskikh tel s vnutrennim magnitoprovodom [Experimental investigation of induction heating of discontinuous hollow cylindrical bodies with an internal magnetic circuit] // Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. 2001, №6., pp. 289–293.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 15.05.18*