

УДК 621.365.511

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ИНДУКТОРА ДЛЯ ЗАКАЛКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Н.Н. Клочкова, А.В. Обухова, А.Н. Проценко

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Представлены результаты экспериментов по определению влияния формы и размера поперечного сечения индуктора на равномерность нагрева сферических поверхностей для закалки. Рассмотрены два варианта формы поперечного сечения индуктора: круглая и квадратная. Размер поперечного сечения индуктора относительно диаметра сферы изменялся в пределах 25÷100 %, воздушный зазор индуктор – сфера и скорость вращения сферы сохранялись неизменными. Наилучшим для достижения равномерности нагрева определен индуктор прямоугольного сечения с относительным размером сечения 55 % от радиуса нагреваемой сферы и наклоном плоскости витка индуктора 30°, максимальный перепад температуры составляет 300 °С при ее максимальном значении 942 °С.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, температура, конструктивные параметры, угол наклона индуктора, форма поперечного сечения.*

Термическая обработка сталей – одна из самых важных операций в машиностроении, от правильного проведения которой зависит качество выпускаемой продукции. Термообработка стали заключается в тепловом воздействии на металл по определенным режимам для изменения его структуры и свойств. Температура нагрева при закалке сталей различной марки меняется приблизительно от 800 до 1300 °С, при этом нагревать требуется равномерно, разброс температуры допускается не более ± 30 °С [1].

При индукционной закалке равномерное распределение температуры по закаливаемой поверхности чаще всего достигается выбором соответствующей конструкции индуктора. В качестве дополнительной меры, улучшающей равномерность нагрева, применяется вращение обрабатываемой детали. Сложные для индукционного нагрева детали, имеющие острые углы, поверхности с резкой кривизной в нескольких направлениях, в частности сферические поверхности, вызывают дополнительные трудности при выборе конструкции индуктора.

В [2, 3, 4] рассматривался процесс нагрева стального шара диаметром 20 мм в одновитковом индукторе из медной трубки с поперечным сечением круглой формы, далее – индуктор круглого сечения (рис. 1).

Внешний диаметр трубки 5 мм, внутренний диаметр 3 мм. Свойства стали: относительная магнитная проницаемость $\mu = 100$, удельное электрическое сопротивление $\rho = 1,3 \times 10^{-7}$ Ом \times м, теплопроводность $\lambda = 45$ Вт/м \times К, удельная объемная теплоемкость $C_p = 3,71 \times 10^6$ Дж/м³К. Исследования проводились с целью опреде-

Наталья Николаевна Клочкова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Алла Васильевна Обухова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александр Николаевич Проценко (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ления *наилучших* конструктивных параметров индукционной нагревательной установки для получения *наилучших* температурных *кондиций* обрабатываемой детали.

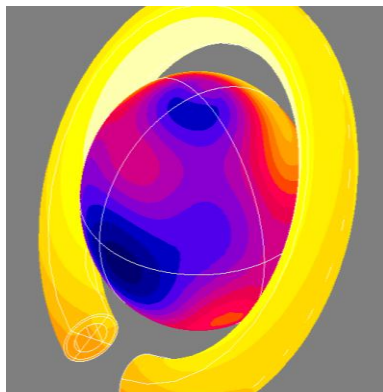


Рис. 1. Внешний вид индукционной нагревательной установки для закалки шаров

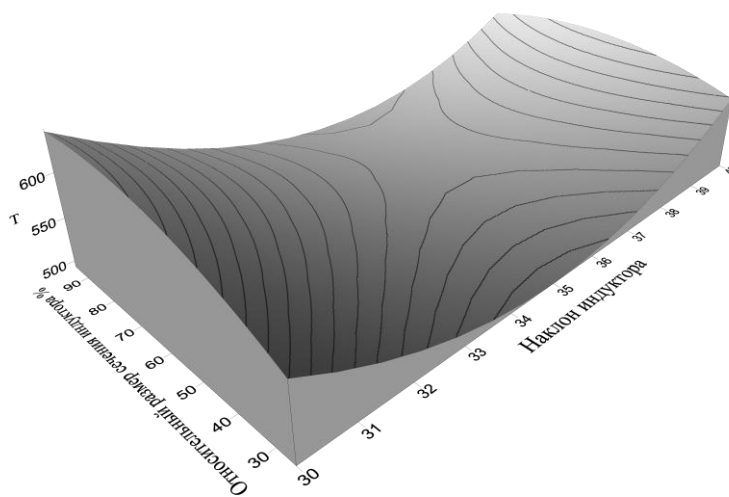
В результате серии вычислительных экспериментов были определены рациональные значения параметров процесса нагрева, определяющих равномерность распределения температуры по поверхности сферы в конце нагрева. Так, скорость вращения нагреваемой сферы определена равной 400 об/мин, напряжение на индукторе 26 В, угол наклона плоскости витка индуктора $\alpha_n = 35$ градусов. Перепад температуры к концу процесса нагрева в указанных условиях составил 452 °С, при этом максимальная температура равна 1100 °С. Очевидно, такой нагрев нельзя считать удовлетворительным.

С целью улучшения равномерности нагрева была проведена серия вычислительных экспериментов для определения влияния формы и размера поперечного сечения индуктирующего проводника на равномерность нагрева (рис. 2).

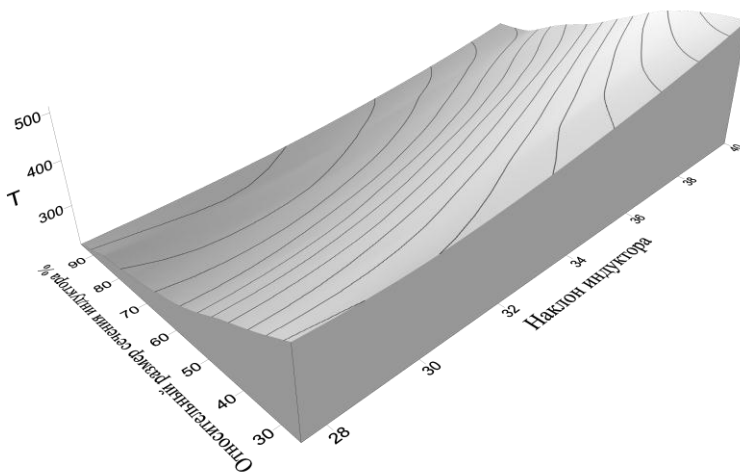
Рассматривались два варианта формы поперечного сечения индуктора: круглая и квадратная. Для сравнения выбрана квадратная форма сечения, так как она обеспечивает увеличенную площадь поверхности взаимодействия индуктора со сферой. В процессе исследования размер поперечного сечения индуктора относительно диаметра сферы изменялся в пределах 25÷100 %, при этом воздушный зазор индуктор – сфера сохранялся неизменным и равным 2мм. Скорость вращения сферы, равная 400 об/мин, также не менялась. Дополнительно контролировалось изменение рациональной величины угла наклона плоскости витка индуктора, определенного в [2, 3, 4], для индуктора круглого сечения диаметром 5 мм. Результаты исследования представлены на рис. 2.

Из рисунка видно, что для индуктора круглого сечения (рис. 2а) существует достаточно четко определенное рациональное значение угла наклона плоскости витка индуктора. Рациональный угол наклона индуктора 35°, который обеспечивает достижение минимального по сравнению с другими углами перепада температуры по поверхности сферы, сохраняет свое значение для всех соотношений радиусов индуктор/сфера.

Для индуктора квадратного сечения (рис. 2б) рациональное значение угла наклона индуктора равно 30°, хотя зависимость менее явная. С увеличением размера сечения перепад температуры уменьшается непрерывно (рис. 3).



a



б

Рис. 2. Перепад температуры на поверхности сферы в конце процесса нагрева в зависимости от наклона плоскости витка индуктора и относительного размера поперечного сечения индуктирующего проводника:
a – круглой формы; *б* – квадратной формы

Из приведенного графика следует, что для достижения наилучшей равномерности нагрева необходимо использовать индуктор квадратного сечения со стороной квадрата, примерно равной диаметру нагреваемой сферы. Однако в этом случае оказывается недостаточно места для размещения приспособлений фиксации и механизмов подачи детали.

Электрическая эффективность индуктора такого сечения резко снижается (рис. 4). Из-за повышенной напряженности магнитного поля в области углов наблюдается сильная неравномерность распределения плотности тока J по сечению индуктора, которая усиливается с увеличением размеров, так для меньшего размера плотность тока увеличивается в 2,3 раза, а для большего – в 2,6 раза. К

тому же в индукторе большого размера поверхность с высокой плотностью тока составляет всего 30 % от общей, тогда как в индукторе малого размера эта доля 45 %.

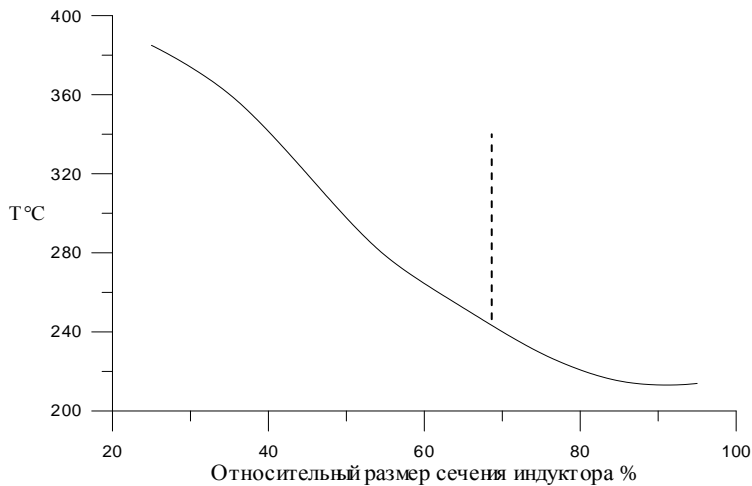


Рис. 3. Перепад температуры на поверхности сферы в конце процесса нагрева в зависимости от отношения $R_{\text{инд}}/R_{\text{сферы}}$ для индуктора квадратного сечения

К тому же из рис. 3 видно, что начиная с относительного значения 55 % и больше влияние изменения размера индуктора уменьшается. Так, для относительных размеров сечения до 55 % скорость снижения перепада температуры в среднем составляет 40 °C, а для больших размеров эта величина снижается до 28 °C.

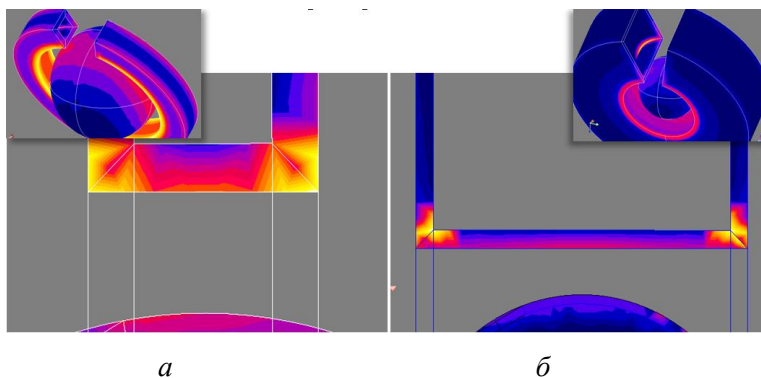


Рис. 4. Распределение плотности тока по сечению индуктора:
а – $R_{\text{инд}}/R_{\text{сферы}}=25\%$; *б* – $R_{\text{инд}}/R_{\text{сферы}}=100\%$

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующий вывод.

Наиболее приемлемым вариантом конструкции рассмотренного в статье индуктора следует считать индуктор прямоугольного сечения с относительным размером сечения 55 % от радиуса нагреваемой сферы и наклоном плоскости витка индуктора 30°. В указанных условиях максимальный перепад температуры составляет 300 °C при ее максимальном значении 942 °C.

В результате проведенных исследований получено значительное улучшение равномерности нагрева по сравнению с индуктором круглого сечения, хотя пере-

пад температуры, требуемый по технологии, не достигнут. Исследования также показали, что достигнут практический предел возможности рассматриваемой конструкции индуктора.

Для дальнейшего улучшения индукционной системы предполагается использование двухвиткового индуктора, сочетающего эффективность круглого и увеличенную поверхность взаимодействия прямоугольного индуктора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
2. Клочкова Н.Н., Обухова А.В., Проценко А.В. Опыт учета нелинейности свойств материалов при решении задач индукционного нагрева средствами программы FLUX // Материалы XVIII международной конференции «Современные концепции научных исследований», Москва, 25–26 сентября 2015 г. – С. 80–84.
3. Обухова А.В., Клочкова Н.Н., Проценко А.Н. Моделирование индукционной установки специального назначения средствами программного пакета Flux // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2016.
4. Обухова А.В., Клочкова Н.Н., Проценко А.Н. Проектирование одновиткового индуктора для закалки сферических деталей средствами программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – Вып. 2 (50). – С. 93–98.
5. Шаранова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – Вып. 7 (28). – С. 180–185.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2017 г.

SHAPE OPTIMIZATION OF THE INDUCTOR FOR HARDENING OF SPHERICAL SURFACES

N.N. Klochkova, A.V. Obukhov, A.N. Protsenko

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The article presents the results of experiments to determine the effects of the shape and size of the cross section of the inductor on the uniformity of heating of spherical surfaces for quenching. Two options were considered cross-sectional shape of the inductor: round and square. The size of the cross section of the inductor relative to the diameter of the sphere was varied in the range of 25÷100 %, the air gap of the inductor-sphere and the rotation speed of the sphere remained unchanged. Best to achieve the homogeneity of the heating is determined, the inductor of rectangular cross section with the relative size of the cross section is 55 % of the radius of the heated sphere, the inclination of the plane spiral inductor 30°. The maximum temperature difference is 300°C at its maximum value of 942 °C.

Keywords: *induction heating, temperature, design parameters, the angle of inclination of the inductor, the cross-sectional shape.*

*Nataliya N. Klochkova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alla V. Obukhov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander N. Protsenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*