



## ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ТОНКИХ ДИСКОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛООВОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

**О. Н. ШАБЛИЙ**, д-р физ.-мат. наук, **Ч. В. ПУЛЬКА**, канд. техн. наук (Тернопольский гос. техн. ун-т им. И. Пулюя),  
**А. С. ПИСЬМЕННЫЙ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Получена математическая модель для определения температурного поля в процессе наплавки диска с помощью двухвиткового кольцевого индуктора с учетом теплового и электромагнитного экранирования, которая позволяет оптимизировать указанную температуру в зоне наплавки диска в зависимости от параметров индуктора, диска, электромагнитного и теплового экранов, а также электрического тока.

*Ключевые слова:* индукционная наплавка, тонкие диски, двухвитковый кольцевой индуктор, оптимизация параметров индуктора, температурное поле, тепловое и электромагнитное экранирование, исследование, расчеты

В работе [1] проведены исследования по оптимизации конструктивных параметров двухвиткового кольцевого индуктора для наплавки тонких круглых и фасонных дисков произвольного диаметра и ширины зоны наплавки с учетом экранирования только электромагнитного поля с целью получения заданного распределения мощности по ширине зоны наплавки. В зависимости от диаметра диска и ширины зоны наплавки, а также с учетом значений коэффициентов экранирования электромагнитных полей ( $K_3 = 1$ ,  $K_3 = 0,25$ ,  $K_3 = 0$  — полное экранирование) подбираются конструктивные размеры двухвиткового кольцевого индуктора [1].

Представляет интерес исследование температурного поля в зоне наплавки с разработкой математической модели для нахождения температуры в диске через параметры двухвиткового кольцевого индуктора, с помощью которого осуществляется нагрев с учетом одновременно электромагнитного и теплового экранирования [2], которые существенно влияют на распределение температуры в зоне наплавки. Разработанная модель позволит проектировать нагревательную систему (индуктор, тепловой и электромагнитный экраны, деталь) для наплавки тонких круглых и фасонных дисков.

Пусть круглый диск (рис. 1) толщиной  $2h$  и радиусом  $r_2$  нагревается с помощью двухвиткового кольцевого индуктора. В этом случае удельная мощность тепловых источников, которые возникают в области диска вследствие действия электромагнитного поля, имеет вид [1]

$$w = \frac{\sigma \omega^2 \mu_0^2}{128 \pi^2 h} [\Delta I_1^2 A^2 a_1^2 + \Delta I_2^2 a_2^2 B^2 + 4 h a_1^2 I_1^2 C^2 e^{-2(r_2 - r)/\Delta}], \quad (1)$$

где  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  — функции радиуса  $r$  [3], геометрических размеров индуктора и диска  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $2h$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $r_2$  (рис. 2), а также физических параметров электромагнитного поля;  $\Delta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)}$  — глубина проникновения электромагнитного поля

в материал диска ( $\omega$  — круговая частота электромагнитного поля;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\sigma$  — электрическая проводимость),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Температурное поле в диске удовлетворяет уравнению теплопроводности [4]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - m^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{w}{\lambda}, \quad (m^2 = \frac{\alpha}{\lambda h}) \quad (2)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала диска;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в среду при отсутствии экрана;  $T = T_1 - T_c$  ( $T_1$ ,  $T_c$  — соответственно температура диска и среды); граничные условия

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha T = 0 \quad \text{при } r = r_2. \quad (4)$$

Анализ подсчетов, приведенный в работе [1], показывает, что электромагнитное экранирование удельной мощности тепловых источников на торце диска значительно влияет на равномерность ее распределения по радиусу, особенно по ширине зоны наплавки ( $r_2 - r_3 = 10 \dots 50$  мм). Если на торце диска реализовать также тепловое экранирование (рис. 1), то поток тепла через торец будет значительно уменьшен или совсем приостановлен, что значительно повлияет на уровень распределения

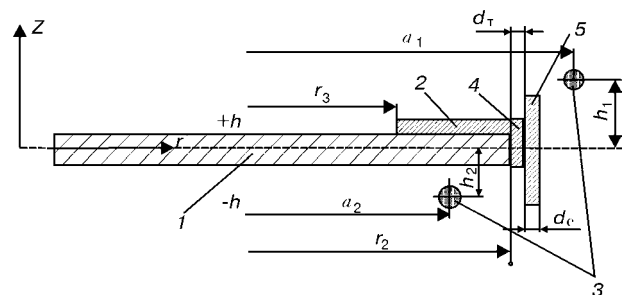


Рис. 1. Поперечное сечение нагревательной системы: 1 — деталь; 2 — шихта; 3 — кольцевой двухвитковый индуктор; 4, 5 — соответственно тепловой и электромагнитный экраны



температуры в зоне наплавки, потери тепла через торец также уменьшатся.

Формула (1) в случае электромагнитного экранирования торца диска может быть записана следующим образом:

$$\omega = \frac{\sigma\omega^2\mu_0^2}{128\pi^2 h} \left[ \Delta I_1^2 A^2 a_1^2 + \Delta I_2^2 a_2^2 B^2 + K_3 4ha_1^2 I_1^2 C^2 e^{(-2(r_2 - r)/\Delta)} \right], \quad (5)$$

в которой  $K_3$  — коэффициент электромагнитного экранирования для экрана, близкоразмещенного к диску [5], имеет вид

$$K_3 = \exp\left(-2 \frac{d_3}{\Delta_3}\right), \quad (6)$$

где  $d_3$  — толщина экрана;  $\Delta_3 = \sqrt{2/(\omega\mu_3\sigma_3)}$  — глубина проникновения электромагнитного поля в экран;  $\sigma_3$  — электрическая проводимость материала экрана.

Если принять толщину экрана  $d_3 = \Delta_3$ , тогда мощность тепловых источников на торце диска уменьшится в  $e^2$  раз, если  $d_3 = 2\Delta_3$  — в  $e^4$  раз, при  $d_3 = 4\Delta_3$  — в  $e^8$  раз (т. е. практически будет равна нулю). При  $K_3 = 0$  имеем полное электромагнитное экранирование, при  $K_3 = 1$  экранирование отсутствует.

Когда на торце диска установлен также тепловой экран, граничное условие (4) имеет следующий вид:

$$\lambda \frac{dT}{dr} + K_T \alpha T = 0 \quad \text{при } r = r_2, \quad (7)$$

где  $K_T$  — коэффициент теплового экранирования [6], который изменяется в промежутке  $0 \leq K_T \leq 1$ . При  $K_T = 0$  — полное тепловое экранирование, при  $K_T = 1$  экранирование отсутствует. Коэффициент теплового экранирования с помощью экрана толщиной  $d_T$  определится из соотношения [6]:

$$K_T \alpha = \frac{\lambda}{d_T}; \quad K_T = \frac{\lambda}{d_T \alpha}, \quad (8)$$

где  $\lambda/d_T$  — коэффициент тепловой проводимости экрана.

Если  $\lambda/d_T = \alpha$ , тогда  $K_T = 1$ , т. е. экранирование отсутствует и происходит конвективный теплообмен со средой и граничное условие (7) имеет вид уравнения (4).

Допустим, что в начальный момент времени температура диска равна температуре среды. Тогда начальное условие для уравнения (2) запишется в виде

$$T = 0 \quad \text{при } t = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (2) при граничном условии (7) и начальном условии (9) в случае, когда удельная мощность определяется по формуле (5), имеет вид

$$T = \frac{a}{\lambda_{gv=1}} \sum_{v=1}^{\infty} \left( \frac{e^{-a\lambda_v^2 t} \int_0^{r_2} \frac{\int_0^{r_2} \omega(r, t) J_0(l_v, r) r dr}{\int_0^{r_2} J_0^2(l_v, r) r dr} e^{a\lambda_v^2 t} J_0(l_v, r), \quad (10)$$

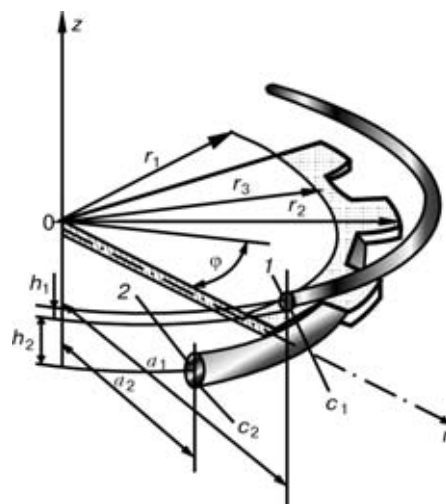


Рис. 2. Схема фрагмента диска с индуктором: 1 — верхний виток индуктора; 2 — нижний

где  $l_v^2 = \lambda_v^2 - m^2$ ;  $\lambda_v = \sqrt{l_v^2 + m^2}$ ;  $J_0(l_v r)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка действительного аргумента;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $l_v$  — корни характеристического уравнения

$$\lambda_v J_1(l_v r_2) + \alpha K_T J_0(l_v r_2) = 0. \quad (11)$$

Таким образом, получена математическая модель нахождения температуры в диске через источник его индукционного нагрева с использованием электромагнитного и теплового экранирования торца диска. Это позволяет определить и оптимизировать указанную температуру в зоне наплавки диска в зависимости от параметров индуктора, диска, электромагнитного и теплового экранов, а также электрического тока.

Для оптимизации параметров индуктора и электрического тока, подаваемого на него, необходимо минимизировать функционал

$$\Phi = \int_0^{\tau} \int_{r_3}^{r_2} (T - T_{зд})^2 r dr dt, \quad (12)$$

где  $T_{зд}$  — температура, при которой осуществляется качественная наплавка порошкообразного твердого сплава на рабочую поверхность диска;  $T$  — температура, которая определяется по формуле (10).

Вследствие того, что в выражение для удельной мощности  $\omega(r, t)$  входят все конструктивные параметры индуктора ( $h_1, h_2, 2h, a_1, a_2, r_2$ ) и электрического тока, подаваемого на него, а также электромагнитного поля, которое им создается, то, реализуя процесс минимизации функционала (12) по необходимым параметрам, получим оптимальный вариант конструкции индуктора и источника электрического тока для обеспечения технологического процесса одновременно по всей рабочей поверхности индукционной наплавки тонкого круглого и фасонного диска.

Для примера расчета индуктора с учетом конструктивных особенностей и возможностей оптимизации задаем геометрические размеры нагрева-

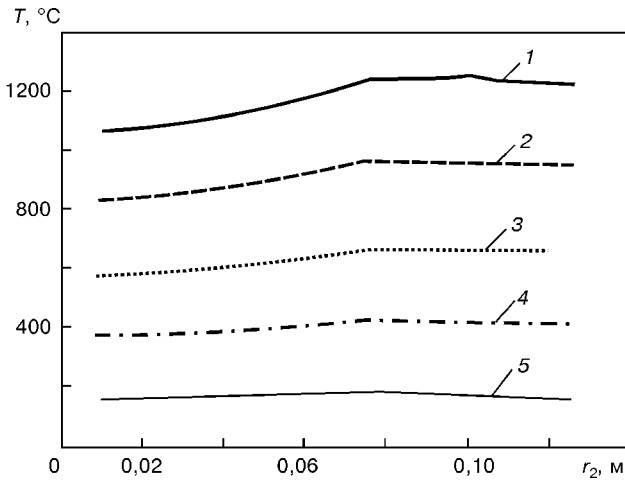


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу диска  $r_2 = 0,125$  м для различных моментов времени: 1 – 22; 2 – 19; 3 – 15; 4 – 11; 5 – 5 с

тельной системы: радиус внешнего витка индуктора  $a_1 = 0,131$  м (см. рис. 1, 2), критерий  $B_i = 0,27$  (для теплоизоляционного материала на внешнем контуре диска из асбошиферного слоя толщиной  $d_r = 0,004$  м, радиус  $r_3 = 0,075$  м (см. рис. 1), время наплавки  $\tau = 22$  с,  $\lambda = 0,35$  Вт/(м<sup>0</sup>.С).

Экспериментальные данные подтверждают, что температура наплавки  $T_1 = 1220$  °С. Тогда при  $T_c = 20$  °С имеем  $T_{зд} = 1200$  °С. Если электромагнитный экран изготовлен из меди, то при круговой частоте  $\omega = 2\pi \cdot 440$  кГц глубина проникновения электромагнитного поля в экран составляет  $\Delta_e = 0,1$  мм.

Возьмем за параметры оптимизации  $a_2, h_2, h_1, A, K_e$ . Выполнив процедуру минимизации функционала по этим параметрам, получим их значения:  $a_2 = 0,0945$  м;  $A = 165,20$ ;  $K_e = 0,655$ ;  $h_2 = 0,0315$  м;  $a_1 = 0,131$  м;  $h_1 = 0,01$  м,  $r_3 = 0,075$  м.

Результаты вычислений температуры в области диска при этих значениях в различные моменты времени представлены в таблице, а их графическое изображение – на рис. 3. Из рисунка видно, что по ширине зоны наплавки (в данном случае  $S = r_2 - r_3 = 0,125 - 0,075 = 0,05$  м) температура почти одинаковая, отклонение от заданной составляет 0,5 %, и равна 1200 °С за время  $\tau = 22$  с (что очень важно при индукционной наплавке). Поскольку твердый сплав (для примера ПГ-С1) расплавляется от поверхности основного металла, толщина наплавленного металла по всей рабочей поверхности равномерная.

После проведенного анализа следует, что конечная (при  $\tau = 22$  с) температура в зоне наплавки в данном случае отклоняется от необходимой не более, чем на 0,5 %. Для реализации найденного оптимального коэффициента электромагнитного экранирования  $K_e = 0,655$  достаточно, согласно формуле (6), использовать медную пластинку толщиной  $d_e = 0,021$  мм, т. е. практически можно выполнить напыление теплового экрана медным порошком или наклеить медную фольгу такой же толщины.

При расчетах приняты следующие данные:

Результаты вычислений температуры (°С) в различных моменты времени в зависимости от радиуса диска

$r_2, \text{ м}$	$\tau$				
	5	11	15	19	22
0,010	129,82	347,82	543,63	792,95	1023,71
0,020	131,79	352,20	550,40	802,74	1036,20
0,030	133,33	357,25	558,69	815,69	1052,42
0,040	137,38	367,11	573,66	836,58	1079,77
0,050	140,55	376,76	589,08	859,19	1108,96
0,060	145,98	390,55	610,06	889,09	1146,96
0,070	150,74	402,31	627,75	914,10	1178,64
0,075	155,25	412,48	624,39	934,13	1199,76
0,080	154,59	410,35	639,98	931,55	1202,21
0,090	154,01	411,21	641,67	934,36	1204,68
0,095	152,86	411,99	641,96	935,54	1205,64
0,100	154,90	413,08	644,25	937,72	1205,64
0,105	154,57	412,16	642,79	935,57	1205,93
0,110	154,62	411,99	641,96	934,56	1201,72
0,120	156,55	413,50	642,76	933,56	1201,99
0,124	157,89	414,78	643,65	933,87	1201,74
0,125	157,67	414,10	642,54	932,22	1199,59

для диска:  $2h = 3$  мм;  $c = 846$  Дж/(кг·°С);  $\lambda = 40$  Вт/(м·°С);  $\gamma = 5969,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma = 1,25 \cdot 10^{-6}$  1/(Ом·м);  $r_2 = 0,125$  м;  $\alpha = 455$  Вт/(м<sup>2</sup>.°С);  $r_3 = 0,075$  м;  $\tau = 22$  с;  $T_{зд} = 1200$  °С. Основной металл – сталь Ст3, наплавленный сплав ПГ-С1, толщина наплавленного металла 0,8... 1,5 мм;

для индуктора (медного):  $\mu = 2,75\mu_0$ ;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\omega = 2,763 \cdot 10^{-6}$  Гц;  $c_1 = 5,0$  мм;  $c_2 = 8,0$  мм;  $\rho = 0,17 \cdot 10^{-7}$  Ом·м;

для электромагнитного экрана (медного):  $\sigma_e = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,17 \cdot 10^{-7}} = 58,8 \cdot 10^6$  1/(Ом·м);  $\mu_e = \mu\mu_0 = 1,4\pi \cdot 10^{-7} = 12,56 \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $K_e = 0,655$ .

Для теплового экрана (асбошифер):  $d_r = 0,004$  м;  $\lambda = 0,35$  Вт/(м·°С);  $\alpha = 455$  Вт/(м<sup>2</sup>.°С);  $K_r = \lambda / (d_r \alpha) = 0,192$ .

## Выводы

1. Полученная математическая модель для нахождения температуры в диске через параметры двухвиткового кольцевого индуктора, с помощью которого осуществляется нагрев с использованием электромагнитного и теплового экранирования, позволяет оптимизировать указанную температуру в зоне наплавки диска в зависимости от параметров индуктора, диска, электромагнитного и теплового экранов, а также электрического тока в индукторе.

2. Разработанный алгоритм позволяет также проектировать нагревательную систему (индуктор, тепловой и электромагнитный экраны, деталь), которая обеспечивает необходимые условия для выполнения технологического процесса наплавки.



3. Разработанная нагревательная система обеспечивает достижение необходимой температуры в зоне наплавки с точностью до 0,5 %.

4. Разработана методика нахождения коэффициентов электромагнитного и теплового экранов, с помощью которых осуществляется регулирование температуры по ширине зоны наплавки со сложной геометрической формой поверхности.

1. Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Письменный А. С. Оптимизация параметров индуктора для равномерного нагрева дисков по ширине зоны наплавки с учетом экранирования // Автомат. сварка. — 2002. — № 11. — С. 24–26.

2. Положительное решение на выдачу патента по заявке 2002119491. Устройство для регулирования мощности в зоне наплавки / О. Н. Шаблій, Ч. В. Пулька, М. С. Михайлишин и др. — Дата подачи заявки 28.11.2002.

3. Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Письменный А. С. Оптимизация конструктивных параметров индуктора для индукционной наплавки тонких стальных дисков // Автомат. сварка. — 1997. — № 6. — С. 17–20.

4. Шаблій О. Н., Пулька Ч. В., Будзан Б. П. Оптимизация энергозатрат при индукционной наплавке тонкостенных дисков // Там же. — 1987. — № 1. — С. 36–39.

5. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. — М.: Связь, 1973. — 480 с.

6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.

Mathematical model has been developed in this article to determine the temperature field in the process of disc surfacing using a two-turn circular inductor with allowance for heat and electromagnetic screening. This model makes it possible to optimize the mentioned temperature in the zone of disc surfacing depending on parameters of inductor, disc, electromagnetic and heat screens, as well as electric current.

Поступила в редакцию 09.06.2003

**MR**  
**CHEMIE**

**MR-Chemie — качество и надежность при контроле поверхностей на наличие трещин**

*Материалы МР-Хеми (Германия) для капиллярного и магнитопорошкового контроля со склада в Киеве*



*Продукция МР-Хеми:*

- жидкие пенетранты, цветные и флуоресцентные;
- линии для контроля жидкими пенетрантами;
- аэрозольное оборудование;
- материалы для магнитопорошковой дефектоскопии черные и флуоресцентные, концентраты;
- ручные магниты, блоки питания;
- ультрафиолетовые лампы, переносные и стационарные;
- контрольные образцы;
- измерительное оборудование;
- вакуумные течеискатели, насосы и принадлежности.

Представительство в Украине:

**НПФ «Диагностические приборы»**  
03126, Киев-126, а/я 507/8  
Офис: бул. И.Ленсе 46  
Тел./факс: (044) 484-70-33, 484-03-69  
E-mail: [ultracon@ukrpack.net](mailto:ultracon@ukrpack.net)

