

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕЖИМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТЕЙ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ

Бережная Е.В., Кассов В.Д.,

Донбасская государственная машиностроительная академия

*Аннотация.* Представлен теплотехнический расчет режима индукционного нагрева поверхностей деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой. Предложенный режим индукционного нагрева наплавленного слоя является промежуточным между закалочным и сквозным нагревом и позволяет произвести нагрев до необходимой температуры на заданную глубину деталей диаметром 50–120 мм.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, расчет, параметры нагрева, наплавленный слой, глубина нагрева.

### Введение

Процесс электроконтактной наплавки компактными материалами (проводами, лентами) осуществляется совместным деформированием привариваемого материала и поверхностного слоя детали, нагретых в зоне деформации короткими импульсами тока [1–3]. Перекрытие сварочных точек между собой достигается вращением детали со скоростью, пропорциональной частоте импульсов тока [3]. Таким образом, электроконтактную наплавку следует понимать как совокупность операций нагрева, деформации и охлаждения водой, в результате которых формирование окончательной структуры нанесенного слоя характеризуется неоднородностью дисперсности и механических свойств, а также различной чувствительностью к концентрации напряжений [4].

Наличие в поверхностном слое неоднородной структуры, обусловленной спецификой процесса наплавки, приводит к снижению стойкости деталей, работающих в условиях концентрации напряжений [5]. Регламентирование комплекса показателей физико-механического характера (механические свойства металла поверхностных слоев, микроструктура, остаточные напряжения с созданием благоприятного их распределения в поверхностном слое) является значительным резервом обеспечения надежности восстановленных деталей.

Для получения заданных характеристик восстановленных деталей требуется поэтапное преобразование свойств в определенной последовательности с постепенным при-

ближением значений свойств к заданным [6, 7].

Стадийность обуславливается тем, что нельзя, с одной стороны, преобразовать одним методом одновременно все разнородные свойства деталей, с другой – получить сразу на одной стадии (операции) весь комплекс требуемых значений результирующих параметров [8]. Таким образом, если электроконтактная наплавка стальной лентой направлена на наращивание поверхностного слоя с преобразованием геометрических параметров детали и структуры материала, то последующая термообработка направлена на улучшение свойств поверхностного слоя для обеспечения высокой стойкости в условиях циклического нагружения.

В этой связи актуальной задачей является повышение эксплуатационной стойкости деталей за счет применения технологий комбинированной обработки.

### Анализ публикаций

Высокие скорости нагрева восстановленных деталей обеспечивают ряд способов. Одним из наиболее эффективных является индукционный нагрев токами высокой частоты, преобразующий электромагнитную энергию в тепловую [9]. При выборе режима и способа термической обработки наплавленного слоя необходимо учитывать, что восстановлению наплавкой подвергается не все изделие, а только изношенные участки, а толщина ленты и глубина зоны термического влияния не превышает нескольких миллиметров [10, 11]. Поэтому наиболее оптимальным в данном случае будет применение

локального поверхностного метода нагрева токами высокой частоты [12], обладающего экономичностью, поскольку нет необходимости нагревать все изделие. Кроме того, к преимуществам индукционной обработки относится большая скорость нагрева, сокращающая время нагрева, по сравнению с пламенным способом, в 2,5 раза и более, а также значительное уменьшение окалинообразования, составляющее в среднем 0,5–0,8 % от массы нагреваемого металла, и снижение обезуглероживания сталей, практически отсутствующего при нагреве до 1100–1200 °С [13].

Применительно к конструкционным сталям рекомендуется нагрев поверхности детали до 880 °С при снижении температуры по глубине около 50–60 °С на каждые 3–4 мм вплоть до границы магнитных превращений, соответствующей 750 °С [10, 11]. Для цилиндрических деталей диаметром 50 мм приведен и обоснован теплотехнический расчет режима индукционного нагрева, при котором одновременно достигаются заданные значения поверхностной температуры и ее распределение по глубине поверхностного слоя [14].

#### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является определение параметров режима нагрева для индукционной обработки поверхностей, восстановленных электроконтактной наплавкой, с заданным распределением температуры по глубине восстанавливаемой рабочей поверхности цилиндрических деталей диаметром 50–120 мм.

Для достижения поставленной цели необходимо произвести аналитическое решение задачи нагрева с заданными параметрами скорости и глубины прогрева поверхностного слоя восстановленного изделия.

#### Расчет параметров режима индукционного нагрева

Предварительные эксперименты [11], а также данные [15] показывают, что при индукционном нагреве скорость роста поверхностной температуры до значения 880 °С не должна превышать 50 °С/с. Аналитическое решение, предложенное в [13], позволяет обеспечить оптимальный режим с заданными параметрами нагрева цилиндрических деталей диаметром 50 мм из конструкционных сталей, который занимает промежуточное положение между закалочным и сквозным

нагревом. Поставленная цель достигнута аналитическим решением задачи.

Глубина прогреваемого слоя  $x_k$  определяется удельной мощностью  $p_0$ , частотой индуктора  $f$  и временем нагрева  $t_k$ . При этом  $x_k$  соответствует точке магнитных превращений. Расчет основан на модели поэтапного сквозного нагрева [9], в которой весь цикл разбит на следующие этапы:

1. Холодный режим – начало нагрева.

2. Первый промежуточный – начинается в момент времени  $t_1 \approx 0,12t_0$ , где  $t_0$  – время сквозного прогрева детали, и поверхностная температура  $T_{01} \approx 650 \dots 700$  °С.

3. Начало второго промежуточного этапа отвечает моменту  $t_2 \approx 0,22t_0$  при глубине прогретого слоя  $x_{k2} = 0,5\Delta_k$  и температуре  $T_{k2}$  на его внутренней границе, равной 750 °С, т.е. выше точки магнитных превращений. В пределах слоя магнитная проницаемость  $\mu = 1$  и удельное сопротивление  $\rho = 10^{-6}$  Ом·м, что справедливо для большинства конструкционных сталей.

Для деталей диаметром  $D_2 = 2R_2 = 50$  мм показано, что оптимальные параметры нагрева достигаются при времени  $t_k$ , совпадающем с моментом окончания второго промежуточного этапа [13]. В этом случае глубина прогреваемого слоя  $x_k \approx 10 \dots 11$  мм и

$$x_k = \Delta_k \geq \xi, \quad (1)$$

где  $\Delta_k$  – глубина проникновения тока, равная

$$\Delta_k \approx 0,503 / \sqrt{f}, \text{ м} \quad (2)$$

$\xi$  – глубина активного (в отношении выделения тепла) слоя, определяемая как

$$\xi = M\Delta_k. \quad (3)$$

Значение параметра  $M$  определяется по табличным значениям  $M$  в зависимости от параметра  $m = (1 - \sqrt{\mu_2}) / (1 + \sqrt{\mu_2})$  и относительной глубины нагруженного слоя  $x_k / \Delta_k = k_1 x_k$  [9].

В рассматриваемом случае  $k_1 x_k = 1$ . Поскольку глубина нагрева сравнительно велика, а удельная мощность мала, в качестве среднего принимается значение  $m = -0,8$ . Тогда относительная магнитная проницаемость ферромагнитной сердцевины  $\mu_2 = 81$  и  $M = 0,944$ . При этом полагается, что электрические параметры не зависят от мощности, а

изменение значений  $m$  в пределах от  $-0,75$  до  $-0,95$  не приводит к существенным ошибкам.

Дополнительным условием выполнения соотношения (1) является  $\Delta_k \leq 0,2D_2$  или  $\xi \leq 0,2D_2$ , которое для рассматриваемого режима нагрева выполняется при значениях диаметров деталей больших 50 мм [13].

Решение уравнения теплопроводности с правой частью, не равной нулю, позволяет определить значение температуры  $T$  на расстоянии  $x$  от поверхности детали [9]

$$T(x) = 2p_0R_2[\tau + S(\alpha, \beta, \tau)]/\lambda, \quad (4)$$

где  $\alpha = 1 - \xi/R_2$  – относительная глубина активного слоя;

$\beta = 1 - x/R_2$  – относительная координата;

$\tau = at/R_2$  – критерий Фурье.

Экспериментально проверены и рекомендованы значения коэффициента теплопроводности  $\lambda = 41,87$  Вт/(м·град) в диапазоне температур от 0 до 800 °С и температуропро-

водности  $a = 6,25 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, соответствующим примерно 800 °С.

Значения вспомогательной функции  $S(\alpha, \beta, \tau)$  при  $\tau \leq 0,2$  приведены в табл. 1–2 [9].

При  $\tau > 0,2$  выражения для  $S(\alpha, \beta, \tau)$  не зависят от  $\tau$  и имеют следующий вид:

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = -\frac{\alpha^2}{8(1-\alpha^2)}(2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4\ln\beta) \quad (5)$$

для  $\beta > \alpha$ ;

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2 \ln \alpha}{2(1-\alpha^2)} \quad (6)$$

при  $\beta < \alpha$ .

Из выражения (4) следует, что значения температуры  $T_0$  на поверхности детали ( $x=0, \beta=1$ ) и  $T_k$  на ее глубине ( $x=x_k, \beta=\beta_k$ ) составят

$$T_0 = 2p_0R_2[\tau + S(\alpha, 1, \tau)]/\lambda; \quad (7)$$

$$T_k = 2p_0R_2[\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)]/\lambda. \quad (8)$$

Таблица 1 – Значения вспомогательной функции  $S(\alpha, \beta, \tau)$  для цилиндра

$\tau$	$\alpha$	$\beta$				
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
0,20	1,0	0,1250	0,0775	0,0350	-0,0025	-0,0350
	0,9	0,1013	0,0788	0,0363	-0,0012	-0,0337
	0,8	0,0800	0,0708	0,0417	0,0042	-0,0283
	0,7	0,0613	0,0563	0,0404	0,0125	-0,0200
	0,6	0,0450	0,0421	0,0329	0,0164	-0,0087
0,15	1,0	0,1175	0,0705	0,0297	-0,0050	-0,0339
	0,9	0,0939	0,0720	0,0312	-0,0037	-0,0336
	0,8	0,0732	0,0645	0,0369	0,0019	-0,0273
	0,7	0,0553	0,0508	0,0362	0,0105	-0,0192
	0,6	0,0400	0,0375	0,0294	0,0147	-0,0080
0,10	1,0	0,1093	0,0630	0,0241	-0,0077	-0,0328
	0,9	0,0860	0,0646	0,0310	-0,0063	-0,0316
	0,8	0,0658	0,0576	0,0318	-0,0006	-0,0263
	0,7	0,0488	0,0448	0,0314	0,0083	-0,0183
	0,6	0,0347	0,0329	0,0260	0,0131	-0,0073
0,05	1,0	0,0906	0,0458	0,0120	-0,0122	-0,0283
	0,9	0,0677	0,0480	0,0137	-0,0110	-0,0272
	0,8	0,0491	0,0426	0,0209	-0,0049	-0,0227
	0,7	0,0345	0,0317	0,0221	0,0043	-0,0155
	0,6	0,0233	0,0220	0,0179	0,0094	-0,0054
0,025	1,0	0,0712	0,0289	0,0018	-0,0133	-0,0205
	0,9	0,0490	0,0317	0,0037	-0,0120	-0,0201
	0,8	0,0362	0,0278	0,0115	-0,0068	-0,0169
	0,7	0,0211	0,0196	0,0138	0,0016	-0,0117
	0,6	0,0132	0,0129	0,0110	0,0063	0,0036

Выражение (7) позволяет определить необходимую удельную мощность  $p_0$  для нагрева поверхности до заданной температуры  $T_0$

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2R_2[\tau + S(\alpha, 1, \tau)]}, \text{ Вт/м}^2. \quad (9)$$

При делении  $T_0$  на  $T_k$  в выражениях (7) и (8) определяется время нагрева  $t_k$

$$T_0 / T_k = \frac{\tau + S(\alpha, 1, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)} \quad (10)$$

$$t_k = \frac{R_2^2}{a} \tau = \frac{R_2^2}{a} \left[ S(\alpha, 1) - \frac{T_0}{T_k} S(\alpha, \beta_k) \right] / \left[ \frac{T_0}{T_k} - 1 \right] \quad (11)$$

Поскольку отношение  $T_0/T_k$  задано, то при  $\tau \leq 0,2$  его значение подбирается интерполированием приведенных табличных данных и последующей подстановкой в критерий Фурье. Для  $\tau > 0,2$  вспомогательная функция  $S(\alpha, \beta, \tau)$  не зависит от  $\tau$ , и подстановка его значения из выражения (10) в критерий Фурье дает время прогрева  $t_k$ :

Оптимальный нагрев под нормализацию деталей диаметром 50 мм достигается при глубине прогрева  $x_k = 10-11$  мм, что соответствует, согласно (2), диапазону частот  $f = 2100-2530$  Гц [14]. Поскольку частота  $f = 2400$  (2500) Гц и является одной из основных в обширной номенклатуре выпускаемых тиристорных преобразователей, то в дальнейшем принимается  $x_k = \Delta_k = 10$  мм.

Таблица 2 – Значения вспомогательной функции  $S(\alpha, \beta, \tau)$  для цилиндра

$\tau$	$\alpha$	$\beta$					
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
0,20	1,0	-0,0625	-0,0850	-0,1025	-0,1150	-0,1225	-0,1250
	0,9	-0,0612	-0,0837	-0,1012	-0,1137	-0,1212	-0,1237
	0,8	-0,0558	-0,0783	-0,0958	-0,1083	-0,1158	-0,1183
	0,7	-0,0475	-0,0700	-0,0875	-0,1000	-0,1075	-0,1100
	0,6	-0,0362	-0,0587	-0,0762	-0,0887	-0,0962	-0,0987
0,15	1,0	-0,0574	-0,0758	-0,0895	-0,0990	-0,1045	-0,1063
	0,9	-0,0562	-0,0747	-0,0885	-0,0980	-0,1036	-0,1054
	0,8	-0,0512	-0,0699	-0,0840	-0,0937	-0,0995	-0,1013
	0,7	-0,0434	-0,0626	-0,0771	-0,0872	-0,0932	-0,0951
	0,6	-0,0329	-0,0526	-0,0667	-0,0782	-0,0845	-0,0864
0,10	1,0	-0,0519	-0,0658	-0,0754	-0,0816	-0,0850	-0,0861
	0,9	-0,0508	-0,0649	-0,0748	-0,0811	-0,0849	-0,0856
	0,8	-0,0462	-0,0609	-0,0712	-0,0779	-0,0817	-0,0829
	0,7	-0,0391	-0,0547	-0,0659	-0,0734	-0,0776	-0,0790
	0,6	-0,0295	-0,0461	-0,0584	-0,0667	-0,0715	-0,0731
0,05	1,0	-0,0382	-0,0439	-0,0470	-0,0485	-0,0495	-0,0497
	0,9	-0,0373	-0,0435	-0,0469	-0,0485	-0,0494	-0,0497
	0,8	-0,0342	-0,0412	-0,0453	-0,0474	-0,0485	-0,0488
	0,7	-0,0289	-0,0376	-0,0428	-0,0456	-0,0472	-0,0476
	0,6	-0,0214	-0,0322	-0,0391	-0,0433	-0,0454	-0,0460
0,025	1,0	-0,0234	-0,0247	-0,0249	-0,0250	-0,0250	-0,0250
	0,9	-0,0233	-0,0247	-0,0249	-0,0250	-0,0250	-0,0250
	0,8	-0,0217	-0,0236	-0,0244	-0,0246	-0,0247	-0,0248
	0,7	-0,0191	-0,0224	-0,0238	-0,0244	-0,0246	-0,0247
	0,6	-0,0141	-0,0119	-0,0227	-0,0240	-0,0245	-0,0247

Порядок расчета параметров нагрева деталей диаметром 50 мм при  $\tau > 0,2$  может быть использован для второго крайнего значения 120 мм из заданного диапазона [13]:

1. Для  $D_2 = 2R_2 = 0,12$  м,  $x_k = \Delta_k = 10^{-2}$  м согласно (3) определяются:  $\xi = M\Delta_k = 0,944 \cdot 10^{-2}$ ;  $\alpha = 1 - \xi/R_2 = 0,8427$ ;  $\beta_k = 1 - x_k/R_2 = 0,8333$ .

2. Значение критерия  $\tau$  определяется его подбором по заданному отношению (10) и составит  $T_0/T_k = 880/750 = 1,173$ .

Задавая  $\tau = 0,2$  по приведенным табличным данным, интерполированием определяется значение вспомогательной функции  $S$  для поверхности детали  $S(0,8427; 1; 0,2) = 0,0891$ .

Аналогично для глубины нагрева  $x_k$  определяется:  $S(\alpha, \beta_k, \tau) = S(0,8427; 0,8333; 0,2) = 0,051$ .

Оптимальный нагрев под нормализацию деталей диаметром 50 мм достигается при глубине прогрева  $x_k = 10...11$  мм, что соответствует, согласно (2), диапазону частот  $f = 2100...2530$  Гц [13]. Поскольку частота  $f = 2400$  (2500) Гц и является одной из основных в обширной номенклатуре выпускаемых тиристорных преобразователей, то в дальнейшем принимается  $x_k = \Delta_k = 10$  мм. Порядок расчета параметров нагрева деталей диаметром 50 мм при  $\tau > 0,2$  может быть использован

для второго крайнего значения 120 мм из заданного диапазона [13].

3. Для  $D_2=2R_2=0,12$  м,  $x_k=\Delta_k=10^{-2}$  м согласно (3) определяются:  $\xi=M\Delta_k=0,944 \cdot 10^{-2}$ ;  $\alpha=1-\xi/R_2=0,8427$ ;  $\beta_k=1-x_k/R_2=0,8333$ .

4. Значение критерия  $\tau$  определяется его подбором по заданному отношению (10):  $T_0/T_k=880/750=1,173$ .

Задавая  $\tau=0,2$  по приведенным табличным данным, интерполированием определяется значение вспомогательной функции  $S$  для поверхности детали:  $S(0,8427; 1; 0,2)=0,0891$ .

Аналогично для глубины нагрева  $x_k$  определяется:  $S(\alpha, \beta_k, \tau)=S(0,8427; 0,8333; 0,2)=0,051$ .

Подстановка полученных значений вспомогательной функции в выражение для  $T_0/T_k$  при  $\tau=0,2$  дает  $T_0/T_k=1,152$ , что меньше заданного значения и, соответственно, требует уменьшения  $\tau$ . Для  $\tau=0,15$  находятся:  $S(0,8427; 1; 0,15)=0,08204$ ;  $S(0,8427; 0,8333; 0,15)=0,04554$ ;  $T_0/T_k=1,18656$ .

Следовательно, искомое значение  $0,15 < \tau < 0,2$ . Для полученных значений функции  $S$  интерполированием подбирается  $\tau$ , для которого  $T_0/T_k=1,173$ . В результате получено:  $\tau=0,1667$  и  $S(\alpha; 1; \tau)=S(0,8427; 1; 0,1667)=0,0844$ .

5. Подстановка полученных значений  $\tau$  и  $S$  в выражения (9) и (11) даст время нагрева  $t_k=R_2^2 \tau / a = 96$  с и необходимое значение удельной мощности при  $f \approx 2500$  Гц  $p_0 = 1,223 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

6. Проверка соответствия заданному изменению температуры нагрева по глубине слоя  $x_k$ , для чего определяется значение  $T_1$  на глубине  $x_1=x_k/2=5 \cdot 10^{-3}$  м. Подстановка в выражение (10)  $T_1$  вместо  $T_k$  позволяет получить:

$$T_1=T_0[\tau+S(\alpha, \beta_1, \tau)]/[\tau+S(\alpha, 1, \tau)], \quad (12)$$

где параметры  $\alpha$ ,  $\tau$  и  $S(\alpha, 1, \tau)$  определены выше,  $\beta_1=1-x_1/R_2=0,9167$ .

Значение вспомогательной функции  $S(\alpha, \beta_1, \tau)=S(0,8427; 0,9167; 0,1667)=0,0723$  находится последовательным интерполированием данных, приведенных в табл. 1. Расчет позволяет получить значение  $T_1$  равное 838 °С. Графическая зависимость изменения температуры по глубине слоя  $x_k$  для диаметра детали 120 мм представлена кривой 1 на рис. 1. Для сравнения на графике приведена зависимость для диаметра 50 мм (кривая 2) [13]. Как видно, в рассматриваемом диапа-

зоне диаметров все зависимости  $T(x)$  расположены между кривыми 1 и 2, т.е. соответствуют заданным параметрам нагрева. Кривая 3 на рис. 1 соответствует распределению температуры в слое  $x_{k1}$  в процессе прогрева и построена по данным работы [13].

Расчет приведен для начала второго промежуточного этапа в поэтапной модели. В этом случае  $x_{k1}=0,5\Delta_k$ ,  $\xi=0,55\Delta_k$  и  $\tau_1=0,14$  при диаметре  $D_2=50$  мм. Как видно из графической зависимости (кривая 3 на рис.1), параметры нагрева соответствуют заданным при диаметре детали 50 мм и заведомо выполняются для больших его значений аналогично кривым 1 и 2.

Для нагрева под нормализацию поверхностного слоя  $x_k=10$  мм и диаметре детали 50 мм получено [13]:  $p_0=1,81 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_k \approx 36$  с;  $\tau \approx 0,358$ .

7. В рассмотренном диапазоне при других значениях диаметров результаты следующие:

7.1.  $R_2=0,03$  м;  $p_0=1,61 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_k=46,4$  с;  $\tau=0,3224$ ;

7.2.  $R_2=0,04$  м;  $p_0=1,413 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_k=65$  с;  $\tau=0,253$ ;

7.3.  $R_2=0,05$  м;  $p_0=1,32 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_k=79$  с;  $\tau=0,197$ .

При этом в зависимости от значения параметра  $\tau$  использовались выражения (5) и (6) или данные таблицы. Графические зависимости времени и необходимой удельной мощности от диаметра детали приведены на рис. 2.

Они позволяют по заданному диаметру определить значения  $p_0$  и  $t_k$ , необходимые для расчета параметров индуктора при нагреве восстановленного поверхностного слоя. При этом в заданном диапазоне диаметров деталей рассматриваемый нагрев занимает промежуточное положение между нагревом под закалку и сквозным прогревом, аналогично расчету для диаметра 50 мм, приведенному в [14].

Следует отметить, что данный подход, основанный на выражениях (1) и (3), может быть использован в случае коротких индукторов, предназначенных для локального нагрева под нормализацию участков цилиндрических деталей. В этом случае необходима компенсация потерь тепла из-за его отвода в холодные участки детали, что приведет к возрастанию времени нагрева или повышению удельной мощности. Предложенный режим индукционного нагрева является промежуточным между закалочным и сквозным

нагревом и позволяет одновременно получить необходимые значения температуры на поверхности и на заданной глубине прогретого слоя цилиндрических деталей диамет-

ром 50–120 мм при нормализации их поверхностей, восстановленных электроконтактной наплавкой.

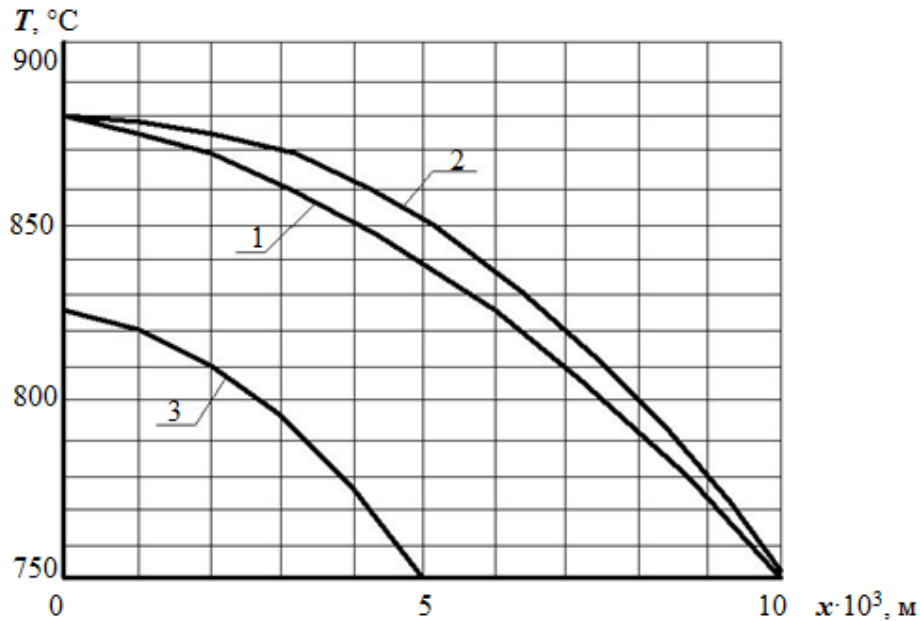


Рис. 1. Распределение температуры в слое  $x_k = 10$  мм для диаметров детали: 1 – 120 мм, 2 – 50 мм, и на промежуточном этапе нагрева при  $x_{k1} = 5$  мм: 3 – 50 мм.

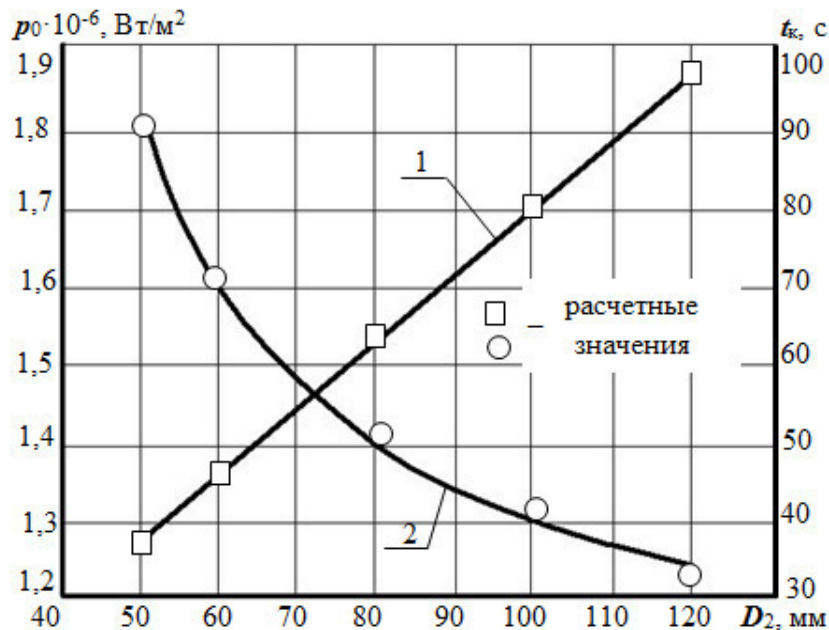


Рис. 2. Зависимости времени нагрева (1) и удельной мощности (2) от диаметра восстановленной детали

### Выводы

1. Представленные соотношения составляют полный алгоритм расчета режима индукционного нагрева для термической обработки цилиндрических поверхностей диаметром до 120 мм, восстановленных электроконтактной наплавкой, и позволяют опре-

делить основные параметры нагрева: удельную мощность, частоту и время прогрева при нормализации восстановленных деталей.

2. Проведенные исследования позволили расширить диапазон диаметров от 50 до 120 мм для индукционного нагрева при нормализации восстановленного поверхностного

слоя цилиндрических деталей, охватив значительную часть номенклатуры деталей типа «вал».

3. Аналитически показано, что с возрастанием диаметра деталей изменение температуры в поверхностном слое приближается к линейному. При этом нагрев остается промежуточным между закалочным и сквозным для режима с постоянной удельной мощностью.

4. Получены графические зависимости удельной мощности и времени прогрева от диаметра детали, позволяющие в диапазоне 50...120 мм рассчитать необходимый индуктор для нагрева при нормализации восстановленных поверхностей.

#### Литература

- Bulychev V.V. Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode / V.V. Bulychev, V.V. Zezyulya // *Welding International*. – 2011. – Vol. 25, No. 5. – P. 374–377. – DOI: 10.1080/09507116.2011.554231.
- Burak P.I. Optimization of the process of electric resistance welding of metallic strips through an amorphous solder / P.I. Burak, A.V. Serov, R.A. Latypov // *Welding International*. – 2012. – Vol. 26, No. 10. – P. 814–818. – DOI: 10.1080/09507116.2011.653168.
- Saifullin R. N. Improvement of Performance of Machine Parts by Electrocontact Welding of Composite Materials / R. N. Saifullin // *Journal of Friction and Wear*. – 2007. – Vol. 28, No. 2. – P. 206–211, DOI: 10.3103/S1068366607020122.
- Berezhnaya E.V. Investigation of microplastic deformation of metal deposited by electric resistance method / E.V. Berezhnaya, V.D. Kuznetsov, V.D. Kassov, P.A. Gavrish // *The Paton Welding Journal*. – 2017. – №7. – P. 19–22. – Available at: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.07.04>
- Chapetti M.D. Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure / M.D. Chapetti, T. Tagawa, T. Miyata // *Materials Science and Engineering*. – Vol. 356. – 2003. – P. 227–23.
- Heng C. Fatigue properties of low carbon low silicon TRP-steel / C. Heng // *Shanghai Metals*, 2009. – Vol.31. - №1. – P. 6–9.
- Marines I. An understanding of a very high cycle fatigue of metals / I. Marines, X. Bin, C. Bathias // *International Journal of Fatigue*. – 2003. – Vol.5. – P. 1101–1107
- Wang Q.Y. Subsurface crack initiation due to ultra-high cycle fatigue / Q.Y. Wang, G. Baudry, C. Bathias, J.Y. Berard // *Advanced in mechanical behavior, plasticity and damage. Proceedings of EUROMAT 2000*. – Vol. 2. – Amsterdam – Lausanne – NewYork: Elsevier, 2000. – P. 1083–1087.
- Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин // Л.: «Энергия», 1974. – 264с.
- Бережная Е.В. Тепловое состояние режущего инструмента в зоне восстановительной электроконтактной наплавки / Е.В. Бережная // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць*. – №34. – 2014. – С. 197–200.
- Бережная Е.В. К расчету температурного поля при электроконтактной наплавке многослойных покрытий / Е.В. Бережная // *Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы IV международной научно-технической конференции*. – 2013. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия. – С. 31.
- Головин Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин // М.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
- Васильев А.С. Высокоинтенсивный индукционный нагрев / А.С. Васильев, В.В. Царевский // *Электричество*. – 2001. – № 12. – С. 37–43.
- Бережная Е.В. Выбор режима индукционного нагрева для нормализации наплавленных поверхностей цилиндрических деталей / Е.В. Бережная // *Вісник Приазовського державного технічного університету: збірник наукових праць*. – Вип. 34. – 2017. – С. 115–123.
- Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бугаков, В.Г. Сысоев. – К.: Наукова думка, 1995. – 256 с.

#### References

- Bulychev, V.V., Zezyulya, V.V. (2011). Electrical resistance deposition with a wire and deceleration of the roller electrode. *Welding International*, 25, 5, 374–377. DOI: 10.1080/09507116.2011.554231.
- Burak, P.I., Serov, A.V., Latypov, R.A. (2012). Optimization of the process of electric resistance welding of metallic strips through an amorphous solder. *Welding International*, 26, 10, 814–818. DOI: 10.1080/09507116.2011.653168.
- Saifullin, R. N. (2007). Improvement of Performance of Machine Parts by Electrocontact Welding of Composite Materials. *Journal of Friction and Wear*, 28, 2. 206–211. DOI: 10.3103/S1068366607020122.
- Berezhnaya, E.V., Kuznetsov, V.D., Kassov, V.D., Gavrish, P.A. (2017). Investigation of microplastic deformation of metal deposited by electric resistance method. *The Paton Welding Journal*, 7, 19–22. Available at: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.07.04>
- Chapetti, M.D., Tagawa, T., Miyata, T. (2003). Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon

- steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure. *Materials Science and Engineering*, 356, 227-23.
6. Heng, C. (2009). Fatigue properties of low carbon low silicon TRP-steel. *Shanghai Metals*, 31, 1, 6-9.
  7. Marines, I., Bin, X., Bathias, C. (2003). An understanding of a very high cycle fatigue of metals. *International Journal of Fatigue*, 5, 1101-1107
  8. Wang, Q.Y., Baudry, G., Bathias, C., Berard, J.Y. (2000). Subsurface crack initiation due to ultra-high cycle fatigue. *Advanced in mechanical behavior, plasticity and damage. Proceedings of EUROMAT 2000*, 2, 1083-1087.
  9. Sluhotskiy, A.E., Ryiskin, S.E. (1974). Induktoryi dlya induktsii-onnogo nagreva [Inductors for induction heating]. 264s. [in Russian].
  10. Berezhnaya, E.V. (2014). Teplovoe sostoyanie rezhushchego instrumenta v zone vosstanovitel'noy elektrokontaktnoy naplavki [Thermal condition of the cutting tool in the zone of recovery electrocontact surfacing]. *Nadiynist instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prats*, 34, 197-200. [in Russian].
  11. Berezhnaya, E.V. (2013). K raschetu temperaturnogo polya pri elektrokontaktnoy naplavke mnogosloynnykh pokrytity [To the calculation of the temperature field in the electric contact surfacing of multilayer coatings]. *Perspektivnyye tehnologii, materialy i oborudovanie v liteynom proizvodstve: Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*, 31. [in Russian].
  12. Golovin, G.F., Zamyatnin, M.M. (1990). Vysokochastotnaya termicheskaya obrabotka [High frequency heat treatment], 239s. [in Russian].
  13. Vasilev, A.C., Tsarevskiy, V.V. (2001). Vysokointensivnyy induktsionnyy nagrev [High intensity induction heating]. *Elektrichestvo*, 12, 37 – 43 [in Russian].
  14. Berezhnaya, E.V. (2017). Vyibor rezhima induktsionnogo nagreva dlya normalizatsii naplavlennyykh poverhnostey tsilindricheskikh detaley [Selection of induction heating mode for normalizing the weld surfaces of cylindrical parts]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicheskogo universitetu: zbirnik naukovih prats*, 34, 115-123. [in Russian].
  15. Babey, Yu.I., Butakov, B.I., Syisoev, V.G. (1995). Poverhnostnoe uprochnenie metallov [Surface hardening of metals], 256s. [in Russian].

**Бережная Елена Валерьевна** – к.т.н., доцент, кафедра подъемно-транспортных машин, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск Донецкой области, +38 098-815-88-65, [elena.kassova07@gmail.com](mailto:elena.kassova07@gmail.com)

**Кассов Валерий Дмитриевич** – д.т.н., профессор, декан машиностроительного факультета, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск Донецкой области, +38 098-816-07-53, [kassovvd@gmail.com](mailto:kassovvd@gmail.com)

#### THERMAL CALCULATION OF THE INDUCTION HEATING MODE OF THE SURFACES RESTORED BY ELECTRIC CONTACT SURFACING

**Berezhnaia O.V., Kassov V.D.,  
Donbass State Engineering Academy**

**Abstract. Problem.** The presence of a heterogeneous structure in the surface layer results in a decrease in the resistance of parts operating under conditions of stress concentration. Therefore, the improvement of the operational stability of fast-wearing machine parts through the use of combined treatment technologies is required. To obtain the specified characteristics of the restored parts, it is necessary to gradually change the properties in a certain sequence with a gradual approximation of the characteristic values to the specified ones. The staging is due to the fact that, on the one hand, it is impossible to change all the dissimilar properties of parts with one method at the same time and, on the other hand, to obtain the whole complex of necessary values of the resulting parameters at one stage. An urgent task is to improve the operational durability of parts through the use of combined technologies using induction treatment of the deposited layer. **Goal.** The purpose of this work is to determine the parameters of the heating mode for induction treatment of surfaces restored by electric contact surfacing with a given temperature distribution over the depth of the restored working surface of cylindrical parts with a diameter of 50 ... 120 mm. **Methodology.** An analytical solution of the heating problem with the specified parameters of the speed and depth of heating of the surface layer of the reconditioned product was made. **Results.** The induction heating mode at a constant power density was proposed and analytically investigated. Given ratios allows determining the main parameters of heating to ensure calculation of the inductor for the normalization of the reconstructed surface of cylindrical parts. **Scientific novelty.** The proposed induction heating mode is intermediate between the quenching and cross-cutting heating and can simultaneously obtain the required temperatures at the surface and at a predetermined depth of the heated layer of cylindrical parts with a diameter of 50-120 mm with the normalization of their surfaces restored with electric contact surfacing. **Practical value.** The results of the analytical calculation of the parameters of the induction heating mode for the normalization of the surface layer of the restored cylindrical parts allow the inductor to be cal-



culated and the generator selected for combined surface treatment.

**Key words:** induction heating, calculation, heating parameters, deposited layer, heating depth.

### ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ПОВЕРХОНЬ, ВІДНОВЛЕНИХ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Бережна О.В., Кассов В.Д., Донбаська державна машинобудівна академія

**Анотація.** Наявність у поверхневому шарі неоднорідної структури, зумовленої специфікою процесу електроконтактного наплавлення, призводить до зниження стійкості деталей, що працюють в умовах концентрації напружень. Отже, необхідним є підвищення експлуатаційної стійкості швидкозношуваних деталей машин шляхом застосування технології комбінованої обробки. Для одержання заданих характеристик відновлених деталей необхідне поетапне зміння властивостей у певній послідовності з поступовим наближенням значень характеристик до заданих. Стадійність обумовлюється тим, що не можна, з одного боку, змінити одним методом одночасно всі різні властивості деталей, а з іншого – одержати одразу на одній стадії весь комплекс необхідних значень результуючих параметрів. Актуальним завданням є підвищення експлуатаційної стійкості деталей за рахунок застосуван-

ня комбінованих технологій з використанням індукційної обробки наплавленого шару. Метою роботи є визначення параметрів режиму нагріву для індукційної обробки поверхонь, відновлених електроконтактним наплавленням, із заданим розподілом температур углиб відновлюваної робочої поверхні циліндричних деталей діаметром 50–120 мм. Проведено аналітичне вирішення задачі нагріву із заданими параметрами швидкості та глибини прогріву поверхневого шару відновлюваного виробу. Запропоновано та аналітично досліджено режим індукційного нагріву за постійної питомої потужності. Представлено залежності, що дозволяють визначити основні параметри нагріву, які забезпечують розрахунок індуктора для нормалізації відновлених поверхонь циліндричних деталей. Запропонований індукційний режим нагріву є перехідним між гартівним та наскрізним нагрівом та дозволяє одночасно одержувати задану температуру на поверхні та на необхідній глибині прогрітого шару циліндричних деталей діаметром 50–120 мм з нормалізацією їх поверхонь, відновлених електроконтактним наплавленням. Одержані результати аналітичного розрахунку параметрів режиму індукційного нагріву для нормалізації поверхневого шару відновлених циліндричних деталей дозволяють провести розрахунок індуктора та вибір генератора для комбінованої обробки поверхні.

**Ключові слова:** індукційний нагрів, розрахунок, параметри нагріву, наплавлений шар, глибина нагріву.