

References:

1. Prokhorov N.N. *Fizicheskie processy v metalle pry svarke* [Physical processes in the metal during welding]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976. 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H., Belov V.V. *Fazovije prevrashchenija e izmenenija svoystv staly pry svarke* [Phase transformations and changes in properties of the steel during welding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 228 p. (Rus.)
3. Finkel V.M. *Fizika razrushenija* [Destruction Physics]. Moscow, Metallurgija Publ., 1970. 376 p.
4. Lisov V.S., Makarova T.A., Fedorov V.G. Structura i stoykost protiv obrazovaniya holodnikh treshchyn metalla okoloshovnoy zony staly 38HS. [The structure and firmnees against of the cold crack formation of the metal heat affected zone steel 38HS]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1982, no. 2, pp. 19-21. (Rus.)
5. Ivanova N.V., Dykun V.N., Vinokurov V.A. Hladostoykost metalla ZTW svarnykh sojedyneniy rezervuarnykh constructsiy [Cold resistance of HAZ metal of tank constructions welded joints]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1985, no. 11, pp. 15-17. (Rus.)
6. Kalensky V.K., Chernyak J.P., Vasilyev V.G., Solomiychuk T.G. Vlijaniye pogonnoy energiji na obrazovaniye otkolov pry naplavke vysokouglerodystoy staly austenitnymi provolokamy [Effect of heat input on the formation of splits in high steel deposition austenitic wires]. *Avtomaticeskaja svarka – Automatic welding*, 2001, no. 11, pp. 11-14. (Rus.)
7. Steklov O.I., Alekseev A.V., Alexandrov O.A. Stoykost naplavlennogo sloja protyv otslaivaniya v vodorodosoderzhashchykh sredakh [The deposited layer resistance against layer removing in hydrogen environments]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1989, no. 12, pp. 8-10. (Rus.)
8. Suslova E.A., Ignatov V.A., Zubchenko A.S. Vlyjaniye tekhnologicheskikh faktorov na sklonnost k obrazovaniyu treshchyn [Influence of technological factors on the crack susceptibility]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1990, no. 5, pp. 35-36. (Rus.)
9. Gotalsky Yu.N., Snisar V.V., Novikova D.P. Sposoby suzheniya martensitnoy prosloykji v zonje splavlenniya perlytnoy staly s austenitnym shvom [Martensitic layer contraction methods in pearlite steel fusion zone with austenitic weld]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1981, no. 6, pp. 7-9. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.04.2017

УДК 621.771.01

© Бережная Е.В.*

ВЫБОР РЕЖИМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Предложен и аналитически исследован режим индукционного нагрева при постоянной удельной мощности. Определены основные параметры нагрева, обеспечивающие расчет индуктора. 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 при нормализации их поверхностей, восстановленных электроконтактной наплавкой.

Ключевые слова: индукционный нагрев, наплавка, восстановление поверхности.

Бережна О.В. Вибір режиму індукційного нагріву для нормалізації наплавлених поверхонь циліндричних деталей. Запропоновано та аналітично досліджено ре-

* канд. техн. наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, elena_kassova@mail.ru

жим індукційного нагріву при постійній питомій потужності. Визначені основні параметри нагріву, що забезпечують розрахунок індуктора. Запропонований режим індукційного нагріву є проміжним між гартівним і наскрізним нагрівом, та дозволяє одночасно отримати необхідні значення температури на поверхні та на заданій глибині прогрітого шару циліндричних деталей при нормалізації їх поверхонь, відновлених електроконтактним наплавленням.

Ключові слова: індукційний нагрів, наплавлення, відновлення поверхні.

O.V. Berezshnaya. Selecting the induction heating for normalization of deposited surfaces of cylindrical parts. The machine parts recovered by electric contact surfacing with metal strip are characterized by high loading of the surface layer, which has a significant impact on their performance. Therefore, the improvement of the operational stability of fast-wearing machine parts through the use of combined treatment technologies is required. Not all the work-piece but just the worn zones are subjected to recovery with electric contact surfacing; the tape thickness and depth of the heat affected zone being not more than a few millimeters. Therefore, the most optimal in this case is the use of a local surface heating method of high frequency currents. This method has economical benefits because there is no need to heat the entire work-piece. The induction heating mode at a constant power density has been proposed and analytically investigated. The ratios that make it possible to determine the main heating parameters ensuring calculation of the inductor for the normalization of the reconstructed surface of cylindrical parts have been given. These parameters are: specific power, frequency and warm-up time. The proposed induction heating mode is intermediate between the quenching and cross-cutting heating and makes it possible to simultaneously obtain the required temperatures at the surface and at the predetermined depth of the heated layer of cylindrical parts with the normalization of their surfaces restored with electric contact surfacing.

Keywords: induction heating, surfacing, surface reconstruction.

Постановка проблеми. Изнашивание деталей, рабочих органов и инструмента является закономерным процессом, неизбежно сопровождающим работу машин, механизмов, промышленного оборудования и представляющим одну из форм их физического старения. Восстановленные электроконтактной наплавкой металлической лентой детали характеризуются высокой нагруженностью поверхностного слоя, что оказывает существенное влияние на их эксплуатационные характеристики [1-2]. Поэтому актуальной задачей является повышение эксплуатационной стойкости быстроизнашивающихся деталей за счет применения технологий комбинированной обработки [3].

Анализ последних исследований и публикаций. Высокие скорости нагрева восстановленных деталей обеспечивает ряд способов. Одним из наиболее эффективных является индукционный нагрев токами высокой частоты, преобразующий электромагнитную энергию в тепловую [4]. При выборе режима и способа термической обработки 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 [5, 6]. Поэтому наиболее оптимальным в данном случае будет применение локального поверхностного метода нагрева токами высокой частоты [7], 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 окисления, составляющее в среднем 0,5-0,8% от массы нагреваемого металла, и снижение обезуглероживания сталей, практически отсутствующего при нагреве до 1100-1200°C [8].

Целью данной работы является выбор оптимального режима индукционного нагрева при нормализации восстановленного поверхностного слоя цилиндрических деталей применительно к конструкционным сталям.

Изложение основного материала. Проведенные предварительные эксперименты [6], а также данные [9] показывают, что существенное улучшение слоя и снижение напряжений после механической обработки достигается при нормализации индукционным нагревом со сле-

дующими параметрами: скорость роста поверхностной температуры не более $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$ с конечным значением $T_0 = 880^{\circ}\text{C}$ и прогрев по глубине $x_{к1} = (3\dots 5)$ мм не должен отличаться более, чем на 50°C , т. е. $T_{к1} = 830^{\circ}\text{C}$ [10]. Поставленная цель достигнута аналитическим решением задачи. Время достижения данного значения поверхностной температуры составляет не менее 18 с и однозначно определяет режим нагрева с постоянной удельной мощностью. Так, при закалочном режиме нагрева с постоянной поверхностной температурой [4] или ускоренном в нагревателях методического действия [11] скорость нагрева поверхности детали достигает $100\dots 200^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что неприемлемо по условиям задачи. Глубина прогреваемого слоя определяется удельной мощностью p_0 , частотой индуктора f и временем нагрева t_k . Режим оптимален при равенстве времени нагрева до заданных значений температуры на поверхности и по глубине детали. Расчет режима основан на модели поэтапного сквозного нагрева [4], 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 $T_{01} \approx 650\dots 700^{\circ}\text{C}$.

3. Начало второго промежуточного этапа отвечает моменту $t_2 \approx 0,22t_0$ при глубине прогретого слоя $x_{к2} = 0,5\Delta_k$ и температуре $T_{к2}$ на его внутренней границе, равной 750°C , 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.

Глубина активного (в отношении выделения тепла) слоя $\zeta = 0,55\Delta_k$ при выполнении дополнительного условия [4]:

$$\zeta \leq 0,2D_2, \quad (1)$$

где $D_2 = 2R_2$ – диаметр детали, в дальнейшем $D_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ м;

Δ_k – горячая глубина проникновения тока, равная:

$$\Delta_k \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} = \frac{0,503}{\sqrt{f}}, \quad \text{м}, \quad (2)$$

где f – частота, Гц.

Поскольку $x_{к2} < \Delta_k$, этап соответствует глубинному прогреву.

4. Момент начала горячего режима $t_3 \approx 0,3t_0$, при котором

$$x_k = \Delta_k \geq \zeta. \quad (3)$$

Режим продолжается до окончания сквозного нагрева и осуществляется за счет теплопроводности, при этом глубина прогретого слоя $x_k > \Delta_k$. Значения μ , ρ и условие (1) те же, что и на предыдущем этапе. Оценка глубины прогретого слоя x_k в предположении линейной зависимости от x изменения температуры в пределах от 880 до 750°C и учета величин $x_{к1}$ и $T_{к1}$ даст значение:

$$x_k = x_{к1} \frac{(T_0 - T_k)}{(T_0 - T_{к1})} = (8\dots 13) \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (4)$$

что существенно больше глубины слоя x_k при закалочном режиме.

Таким образом, режим нагрева будет промежуточным между закалочным и сквозным нагревом, соответствуя началу горячего режима, а заданное распределение температур может быть получено из решения уравнения теплопроводности и условий (1) и (3). Относительная глубина наружного слоя x_k/Δ_k задается параметром k_1 в соотношении $x_k/\Delta_k = k_1 x_k$. В рассматриваемом случае $x_k = \Delta_k$ и $k_1 x_k = 1$. Глубина активного слоя ζ связана с Δ_k выражением:

$$\zeta = M\Delta_k. \quad (5)$$

Расчет проводили по методике [4], согласно которой значением параметра M можно определить по табличной зависимости M от $k_1 x_k$ и параметра $m = \frac{(1 - \sqrt{\mu_2})}{(1 + \sqrt{\mu_2})}$.

Поскольку глубина нагрева сравнительно велика, а удельная мощность мала, в качестве среднего значения принимается $m = -0,8$. Это соответствует относительной магнитной проницаемости ферромагнитной сердцевины цилиндра $\mu_2 = 81$ и $M = 0,944$. При таком усреднении 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. Значение температуры T на расстоянии x от поверхности может быть получено из решения уравнения теплопроводности с

правой частью, не равной нулю [12]:

$$T_x = 2 \frac{p_0 R_2}{\lambda} [\tau + S(\alpha, \beta, \tau)], \quad (6)$$

где $\alpha = 1 - \zeta/R_2$ – относительная глубина активного слоя;
 $\beta = 1 - x/R_2$ – относительная координата;
 $\tau = at/R_2^2$ – критерий Фурье.

Экспериментально проверены и рекомендованы значения коэффициента теплопроводности $\lambda = 41,87$ Вт/(м·град) в диапазоне температур от 0 до 800°C и температуропроводности $a = 6,25 \cdot 10^{-6}$ м²/с, соответствующим примерно 800°C. Выражение для $S(\alpha, \beta, \tau)$ имеет следующий вид:

$$S(\alpha, \beta, \tau) = -\frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) \left(1 - e^{-v_n^2 \tau}\right),$$

где I_0 и I_1 – символы функций Бесселя нулевого и первого порядка первого рода;
 v_n – корни уравнения $I_1(v_n) = 0$, значения которых содержатся в [13].

Выражение для $S(\alpha, \beta, \tau)$ упрощается, если разбить его на две суммы и первую из них выразить в конечном виде. Тогда для области внутри активного слоя ζ ($\beta > \alpha$):

$$S(\alpha, \beta, \tau) = -\frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 \tau} - \frac{2\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta).$$

Соответственно, для области вне активного слоя ζ ($\beta < \alpha$):

$$S(\alpha, \beta, \tau) = -\frac{2\alpha}{1-\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1(v_n \alpha)}{v_n^3 [I_0(v_n)]^2} I_0(v_n \beta) e^{-v_n^2 \tau} + \frac{\beta^2}{4} + \frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha^2)} \ln \alpha.$$

Можно убедиться, что при $\beta = \alpha$, т. е. на границе активного слоя, оба выражения дают одинаковый результат. При $\tau < 0,2$, что соответствует малым временам прогрева (закалочный режим), значения вспомогательной функции $S(\alpha, \beta, \tau)$ приведены в [4]. Для $\tau > 0,2$ выражения для $S(\alpha, \beta, \tau)$ не зависят от τ и принимают следующий вид:

$$S(\alpha, \beta, \tau) \approx S(\alpha, \beta) = -\frac{\alpha^2}{8(1-\alpha^2)} (2\beta^2 + \alpha^2 - 3 - 4 \ln \beta) \text{ при } \beta > \alpha; \quad (7)$$

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

Из выражения (6) следует, что значения температуры T_0 и T_k на поверхности детали ($x = 0, \beta = 1$) и на ее глубине ($x = x_k, \beta = \beta_k$) будут:

$$T_0 = 2 \frac{p_0 R_2}{\lambda} [\tau + S(\alpha, 1, \tau)]; \quad (9)$$

$$T_k = 2 \frac{p_0 R_2}{\lambda} [\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)]. \quad (10)$$

Выражение (9) позволяет определить необходимую удельную мощность p_0 для нагрева поверхности до температуры T_0 :

$$p_0 = \frac{\lambda T_0}{2 R_2 [\tau + S(\alpha, 1, \tau)]}, \text{ Вт/м}^2. \quad (11)$$

При делении T_0 на T_k в выражениях (9) и (10) определяется время нагрева t_k :

$$\frac{T_0}{T_k} = \frac{\tau + S(\alpha, 1, \tau)}{\tau + S(\alpha, \beta_k, \tau)} = f(t_k). \quad (12)$$

Значение τ подбирается по заданному отношению T_0/T_k при $\tau < 0,2$. Для $\tau > 0,2$ подстановка τ из выражения (12) в критерий Фурье даст время прогрева t_k :

$$t_k = \frac{R_2^2}{a} \tau = \frac{R_2^2}{a} \cdot \frac{S(\alpha, 1) - \frac{T_0}{T_k} S(\alpha, \beta_k)}{\frac{T_0}{T_k} - 1}. \quad (13)$$

Приведенные соотношения позволяют по заданным значениям $x_k = \Delta_k = (8...11) \cdot 10^{-3}$ м, $T_0/T_k = 880/750 = 1,173$, R_2 и $x_1 = x_k/2$ рассчитать удельную мощность p_0 , время нагрева t_k , температуру T_{k1} в середине прогретого слоя и частоту f . Порядок расчета следующий (для определенности $x_k = 11 \cdot 10^{-3}$ м):

1. Для заданных $D_2 = 2R_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ м, $x_k = \Delta_k$ согласно (5) определяется $\zeta = M\Delta_k = 0,944 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 10,384 \cdot 10^{-3}$ м, вычисляются $\alpha = 1 - \zeta/R_2 = 0,5846$ и $\beta_k = 1 - x_k/R_2 = 0,56$ и проверяется выполнение условия (1). В данном случае $\zeta \approx 0,2D_2$ и определяет максимальное значение x_k .

2. Используя выражения (7) и (8), вычисляются $S(\alpha;1) = 0,0427$ и $S(\alpha;\beta_k) = -0,0182$ и, согласно (12), по заданному T_0/T_k определяется значение критерия Фурье $\tau = 0,3707$. Поскольку $\tau > 0,2$, то расчет согласно (7) и (8) вполне корректен.

3. Подставляя значения T_0 , $S(\alpha;1)$ и τ в (11) и (13), получим $p_0 = 1,78 \cdot 10^6$ Вт/м² и $t_k = 37,1$ с.

4. Согласно (2), частота индуктора будет $f = 2100$ Гц.

5. Графическая зависимость $T(x)$ задается значением температуры T_1 на глубине $x_1 = x_k/2 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м. В этом случае $\beta_1 = 1 - x_1/R_2 = 0,78$ и $S(\alpha;\beta_1) = 0,02905$ и посредством выражения (12) определяется $T_1 = T_0[\tau + S(\alpha;\beta_1)]/[\tau + S(\alpha;1)] = 851^\circ\text{C}$.

Аналогично определяются параметры нагрева при $x_k = (8; 9 \text{ и } 10) \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты расчетов следующие:

1. $x_k = 8 \cdot 10^{-3}$ м; $p_0 = 1,96 \cdot 10^6$ Вт/м²; $t_k = 31,4$ с; $f = 3950$ Гц; $T_1 = 849,7^\circ\text{C}$.

2. $x_k = 9 \cdot 10^{-3}$ м; $p_0 = 1,87 \cdot 10^6$ Вт/м²; $t_k = 33,9$ с; $f = 3100$ Гц; $T_1 = 850,1^\circ\text{C}$.

3. $x_k = 10^{-2}$ м; $p_0 = 1,81 \cdot 10^6$ Вт/м²; $t_k = 35,8$ с; $f = 2530$ Гц; $T_1 = 850,6^\circ\text{C}$.

4. $x_k = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м; $p_0 = 1,78 \cdot 10^6$ Вт/м²; $t_k = 37,1$ с; $f = 2100$ Гц; $T_1 = 851^\circ\text{C}$.

Из результатов расчетов и графических зависимостей следует:

- Значения удельной мощности $p_0 = (1,8...2,0) \cdot 10^6$ Вт/м² при времени прогрева $t_k = 31...37$ с существенно меньше аналогичных для закалочного режима $\sim(5,5...6,0) \cdot 10^6$ Вт/м², $t_k \sim 10...15$ с и больше, чем в случае сквозного прогрева $\sim(0,5...0,6) \cdot 10^6$ Вт/м² [4]. То есть рассмотренный режим является промежуточным.

- Рост поверхностной температуры до 880°C происходит за время не менее 30 с, т. е. со скоростью не более $30^\circ\text{C}/\text{с}$, что меньше заданного значения $50^\circ\text{C}/\text{с}$.

- Предположение о линейной зависимости $T(x)$ в прогретом слое может служить для предварительной оценки значения x_k .

- Увеличение глубины x_k приводит к уменьшению наклона характеристики $T(x)$, а, следовательно, к выравниванию прогрева поверхностного слоя. Ограничение на величину x_k накладывает условие (1), т. е. $x_k \leq 11 \cdot 10^{-3}$ м.

- Замена графической зависимости $T(x)$ ломаной линией с шагом 1 мм (10^{-3}) позволяет определить разность температур ΔT_1 на этой глубине. Суммирование этих значений на смежных участках (от 3-х до 5-ти) определит суммарную разность на выбранном участке прогретого слоя.

- Линия 5 на рисунке дает граничное значение глубины прогрева, при которой разность температур нагрева в пределах слоя 3 мм не превышает 50°C . Для более глубоких слоев эта разность растет, достигая 65°C для кривой 3 и 60°C , соответственно, для кривой 4, что близко к заданному значению.

- Для зависимостей 3 и 4 частота нагрева равна 2100-2500 Гц, причем частота 2400 Гц является одной из основных в обширной номенклатуре выпускаемых тиристорных преобразователей.

Для проверки соответствия заданным условиям роста поверхностной температуры, рассчитывается ее значение в начале второго промежуточного режима поэтапной модели нагрева. Параметры для расчета те же, что и выше, т. е. $x_k = \Delta_k = 11 \cdot 10^{-3}$ м, $p_0 = 1,78 \cdot 10^6$ Вт/м². В этом режиме $x_{k2} = 0,5\Delta_k = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\zeta_2 = 0,55\Delta_k = 6,05 \cdot 10^{-3}$ м, $T_{k2} = T_k = 750^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 1 - \zeta_2/R_2 = 0,758$ и $\beta_{k2} = 1 - x_{k2}/R_2 = 0,78$. Посредством выражения (7) определяются $S(\alpha_2; \beta_{k2}) = S(0,758; 0,78) = 0,03626$ и $S(\alpha_2; 1) = S(0,758; 1) = 0,07182$. Из выражения (10) получают $\tau = 0,3161$, что больше 0,2. Из (12) следует значение поверхностной температуры $T_{02} \approx 826^\circ\text{C}$, а из выражения (13) – время $t_{k2} = 31,6$ с. Используя значение $t_k = 37,1$ с легко убедиться, что на промежуточном этапе также выполняются заданные параметры нагрева детали. В расчете не учитываются тепловые потери. Последние уменьшаются до 10-15% теплоизолирующим цилиндром и компенсируются соответствующим увеличением удельной мощности нагрева при расчете индуктора под заданную номенклатуру деталей.

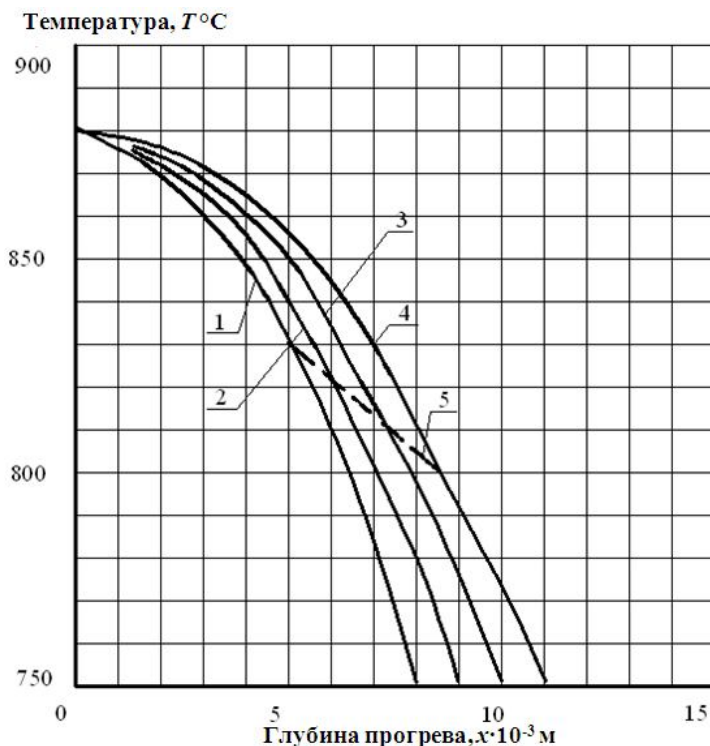


Рисунок – Распределение температуры в поверхностном слое при различных глубинах прогрева x_k : 1 – $8 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $9 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – 10^{-2} м; 4 – $11 \cdot 10^{-3}$ м; 5 – линейная зависимость увеличения разности температуры в поверхностном слое до $(60 \dots 65)^\circ\text{C}$ на 3 мм глубины прогрева

Графические зависимости и результаты расчетов показывают, что увеличение времени нагрева t_k при уменьшении удельной мощности p_0 (кривые 1-4 на рисунке) выравнивают распределение температуры $T(x)$ в прогретом слое x_k . Из выражений (11) и (13) следует, что с ростом диаметра детали удельная мощность p_0 уменьшается, а время прогрева t_k увеличивается. Следовательно, при данном режиме нагрева для диаметров больше 50 мм надо ожидать более равномерное распределение температуры в поверхностном слое.

Выводы

Проведенные исследования позволили предложить режим индукционного нагрева, обеспечивающий необходимые значения температуры поверхности и на заданной глубине прогретого слоя при нормализации восстановленных цилиндрических деталей.

Аналитическое решение задачи показало, что с увеличением диаметра детали более 50 мм зависимость температуры в пределах нагретого слоя приближается к линейной, а предложенный режим при постоянной удельной мощности является промежуточным между закалочным и сквозным нагревом.

Приведенные соотношения позволяют определить основные параметры нагрева: удельную мощность, частоту и время прогрева, обеспечивающие расчет индуктора для нормализации восстановленных поверхностей цилиндрических деталей.

Список использованных источников:

1. Сабиров О.Н. Исследование свойств наплавленного антифрикционного сплава / О.Н. Сабиров, Г.Г. Онищенко, А.А. Слободяник // Труды Одесского политехнического университета. – 2003. – Вып. 1 (19). – С. 8-11.
2. Фархшатов М.Н. Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионностойких сталей / М.Н. Фархшатов // Вестник ОГУ, Башкирский государственный аграрный университет. – 2006. – № 9. – Ч. 2. – С. 349-352.
3. Бережная Е.В. Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на

- физико-механические характеристики покрытия / Е.В. Бережная, А.В. Лапченко, М.А. Турчанин // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, ДДМА. – 2016. – № 38. – С. 125-131.
4. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
 5. Бережная Е.В. Тепловое состояние режущего инструмента в зоне восстановительной электроконтактной наплавки / Е.В. Бережная // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : Зб. наук. пр. – Краматорськ, ДДМА. – 2014. – № 34. – С. 197-200.
 6. 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. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 31.
 7. Головин Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин. – М. : Машиностроение, 1990. – 239 с.
 8. Васильев А.С. Высокоинтенсивный индукционный нагрев / А.С. Васильев, В.В. Царевский // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 37-43.
 9. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысов. – К. : Наукова думка, 1995. – 256 с.
 10. Биндин В.М. Индукционный нагрев при производстве особо чистых материалов / В.М. Биндин, В.И. Добровольская, Д.Г. Ратников. – Л. : Машиностроение, 1980. – 65 с.
 11. Кассов В.Д. Теплотехнический расчет индукторов для нагрева перемещающихся цилиндрических заготовок / В.Д. Кассов, А.В. Жартовский, А.Н. Белозерцев // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2007. – № 2Е (10). – С. 99-105.
 12. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
 13. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш // М. : Наука, 1977. – 344 с.

References:

1. Sabirov O.N., Onischenko G.G., Slobodyanik A.A. Issledovanie svoystv naplavlennogo anti-friktsionnogo splava [Investigation of properties of a surfaced antifriction alloy]. *Odes'kyi Politechnichniy Universitet. Pratsi – Labours of the Odessa Polytechnic University*, 2003, no. 1 (19), pp. 8-11. (Rus.)
2. Farhshatov M.N. Opredelenie ostatochnykh napryazheniy pokryitiy, nanesennykh elektrokontaktnoy privarkoy lenty iz korrozionno-stoykikh staley [Detrmination of resting potential of coverings applied with electrocontact welding of band out of corrosent-stable steel]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta – Bulletin of Bashkir University*, 2006, no. 9, vol. 2, pp. 349-352. Available at: <http://www.osu.ru/doc/1026/author/4713/lang/1>. (Rus.)
3. Berezshnaya E.V., Lapchenko A.V., Turchanin M.A. Issledovanie vliyaniya kombinirovannoy termomehanicheskoy obrabotki na fiziko-mehanicheskie harakteristiki pokryitiya [Investigation of combined thermomechanical treatment effect on the physical and mechanical characteristics of the metal coating]. *Nadiynist Instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem: zbirnik naukovih prats – Reliability of the tool and optimisation of technological systems: collection of science works*, 2016, no. 38, pp. 125-131. (Rus.)
4. Sluhotskiy A.E., Ryiskin S.E. *Induktoryi dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 264 p. (Rus.)
5. Berezshnaya E.V. Teplovoe sostoyanie rezhushchego instrumenta v zone vosstanovitelnoy elektrokontaktnoy naplavki [Thermal state of the cutting tool in the zone of reducing electrocontact surfacing] *Nadiynist Instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem: zbirnik naukovih prats – Reliability of the tool and optimisation of technological systems: collection of science works*, 2014, no. 34, pp. 197-200. (Rus.)
6. Berezshnaya E.V. K raschetu temperaturnogo polya pri elektrokontaktnoy naplavke mnogoslownykh pokryitiy. *Materialyi IV Mezhd. nauk.-tehn. konf. «Perspektivnyie tehnologii, materialyi i oborudovanie v liteynom proizvodstve»* [The calculation of the temperature field in the electrocontact surfacing of multilayer coatings. Materials of the IVth Int. sci.-tech. conf. «Perspective technologies, materials and equipment in foundry»]. Kramatorsk, 2013, p. 31. (Rus.)
7. Golovin G.F., Zamyatnin M.M. *Vyisokochastotnaya termicheskaya obrabotka* [High-frequency

- heat treatment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 239 p. (Rus.)
8. Vasilev A.C., Tsarevskiy V.V. Vysokointensivnyiy induktsionnyiy nagrev [High-intensity induction heating]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2001, no. 12, pp. 37-43. (Rus.)
 9. Babey Yu.I., Butakov B.I., Syisoev V.G. *Poverhnostnoye uprochnenie metallov* [Surface hardening of metals]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1995. 256 p. (Rus.)
 10. Bindin V.M., Dobrovolskaya V.I., Ratnikov D.G. *Indukcionniy nagrev pri proizvodstve osobo chistih materialov* [Induction heating for the production of extremely pure materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 65 p. (Rus.)
 11. Kassov V.D., Zhartovskiy A.V., Belozertsev A.N. Teplotekhnicheskiiy raschet induktorov dlya nagreva peremeschayuschihsiya tsi-lindricheskikh zagotovok [Thermotechnical calculation of inductors for heating of moving cylindrical billets]. *Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitel'noy akademii – Herald of DSEA*, 2007, no. 2E (10), pp. 99-105. (Rus.)
 12. Lyikov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 599 p. (Rus.)
 13. Yanke E., Emde F., Lyosh F. *Spetsialnyie funktsii* [Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 344 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.04.2017

УДК 669.045:669.046.581.2

© Чигарев В.В.¹, Коваленко И.В.²

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ, СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье представлено описание построения и обоснования модели усталостного разрушения, объединяющей такие стадии, как образование и рост трещин в элементах судовых конструкций, имеющих различные концентраторы напряжений. Представленная для рассмотрения модель усталостного разрушения включает в себя образец для проведения исследований много- и малоциклового усталости поврежденного материала, а также условие, определяющее начальный размер макротрещины и характеризующее переход от первой стадии усталостного разрушения к последующей.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, усталостное разрушение, микро- и макропластические деформации, сварной шов, дефекты, трещиностойкость.

Чигарев В.В., Коваленко И.В. Дослідження процесу втомного руйнування елементів та деталей судових допоміжних механізмів та конструкцій при виникненні різних концентраторів напружень. У статті представлено опис побудови і обґрунтування моделі втомного руйнування, що об'єднує такі стадії, як утворення й зростання тріщин в елементах судових конструкцій, що мають різні концентратори напружень. Представлена для розгляду модель втомного руйнування включає в себе зразок для проведення досліджень багато- і малоциклової втоми пошкодженого матеріалу, а також умову, що визначає початковий розмір макротріщини і характеризує перехід від першої стадії втомного руйнування до наступної.

¹ д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, chigarew@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Азовский морской институт», г. Мариуполь, oksykov19@gmail.com