

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ЗАГОТОВКЕ ПРИ НАРУЖНОМ И ВНУТРЕННЕМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Бежавин К.Е.¹, Сосновский И.А.², Худолей А.Л.²

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
e-mail: dz-m@tut.by

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
e-mail: sos3@tut.by

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности разных видов индукционного нагрева, используемых в технологии центробежного нанесения покрытий.

В каждом эксперименте две термопары зачеканивали на внутренней и наружной поверхности, а две другие закрепляли на глубине 2 и 6,4 мм, соответствующей глубине проникновения токов для частоты 66 кГц и 8 кГц. Толщину стенки трубчатой заготовки X_k принимали равной глубине проникновения тока для частоты $\nu = 2,4$ кГц, то есть 10 мм. Для нагрева использовали ламповый генератор ЛПЗ 2-67М и машинные преобразователи ИЗ3-100/2,4 и ИЗ4-100/8.

Оценим эффективность разных видов индукционного нагрева, для чего используем полученное экспериментально распределение температур по толщине стенок цилиндров при внутреннем и наружном нагреве (рис.1 и 2). При анализе будем учитывать, что полная энергия, выделенная в заготовке, пропорциональна площади, расположенной под кривыми полученного распределения температур.

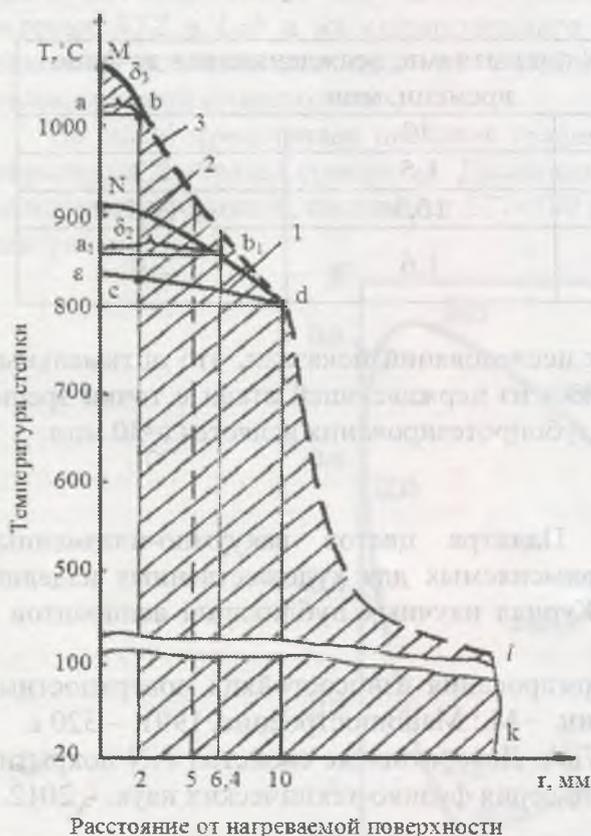


Рисунок 1- Распределение температуры в стенке полого цилиндра при наружном нагреве при разных частотах, кГц: 1 – $\nu = 2,4$; 2 – $\nu = 8$; 3 – $\nu = 66$.

Рассмотрим сначала распределение температур в стенке полого стального цилиндра (труба 100x10 и $\ell = 120$ мм), полученное при нагреве на разных частотах наружной поверхности до момента стабилизации одинаковой температуры на внутренней поверхности, представленное на рис.1.

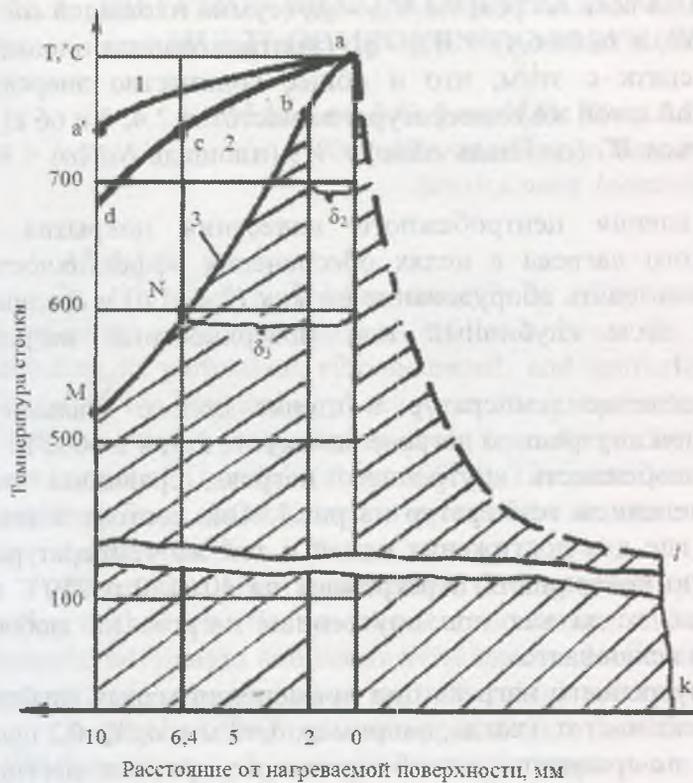


Рисунок 2 – Распределение температуры в стенке полого цилиндра при внутреннем нагреве на разных частотах, кГц: 1 - $\nu = 2,4$; 2 - $\nu = 8$; 3 - $\nu = 66$

Из графика (рис.1) следует, что эффективность нагрева с увеличением отношения $\frac{\delta_e}{X_k}$ возрастает и достигает максимума при $\frac{\delta_e}{X_k} = 1$. Это утверждение хорошо иллюстрируется графически по изменению площадей, отражающих потери энергии на нагрев при каждой частоте. Так, например, при нагреве заготовки толщиной X_k на самой высокой частоте 66 кГц (при $\delta_3 = 2$ мм и $\delta_e/X_k = 0,2$) идеальным было бы распределение температуры по сторонам ab и b_2 прямоугольника ab_20 , площадь которого отражает минимальную или полезно затрачиваемую на нагрев энергию q_{n3} . При этом общее количество энергии W_{03} (квт.с), сообщаемое детали в процессе нагрева, отражается площадью, заключенной в границах фигуры $Mdlko$. Соответствующие потери на нагрев (заштрихованная площадь фигур abm и $bdlk_2$ рис.1) будут равны $W_{03} - q_{n3}$. В связи с этим, для достижения на внутренней поверхности температуры 800°C , наружную поверхность перегревали на 250°C . Для нагрева все той же заготовки до требуемой температуры 800°C внутренней поверхности на частоте 8 кГц (при $\delta_e = 6,4$ мм) потребовался меньший по сравнению с нагревом на частоте 66 кГц перепад температуры в 120°C . Уменьшение этого показателя можно объяснить лишь повышением эффективности нагрева, обусловленной уменьшением частоты и увеличением глубины проникновения токов. Графически это подтверждается возросшей площадью прямоугольника a_1b_1 6,4, свидетельствующего о полезно затрачиваемой энергии q_{n2} , уменьшением площади $Ndlko$, отражающей общее количество затрачиваемой энергии W_{02} , и уменьшением суммы площадей, заключенных в фигурах Nb_1a_1 и b_1dlk , отождествляемых с уменьшением потерь, то есть $W_{02} - q_{n2} < W_{03} - q_{n3}$. Аналогичный нагрев при частоте токов 2,4 кГц ($X_k = \delta_1 = 10$ мм) обеспечивает самый низкий ($30...40^\circ\text{C}$) перепад температуры между наружной и внутренней поверхностью и максимальную эффективность нагрева в связи с тем, что площадь прямоугольника $Cd10$ 0, отражающего полезно затрачиваемую энергию q_{n1} , занимает всю толщину заготовки, а одна из границ (d 10) так называемого идеального прямоугольного распределения температуры по линии Cd 10 граничит с внутренней поверхностью. При этом затраты энергии на перегрев заготовки при частоте 2,4 кГц (площадь edc) меньше, чем при частоте 8 кГц (площадь Ndc) и частоте 66 кГц (площадь Mdc), а также соответственно

меньше и непроизводительные потери на весь нагрев, т.е. $W_{01} - q_{n1}$ (сумма площадей ϵdc и $d1k10$) $< W_{02} - q_{n2}$ (сумма площадей $a_1 Nb_1$ и $b_1 d1k 6,4$) $< W_{03} - q_{n3}$ (заштрихованная площадь aMb и $b d1k2$). Вполне очевидно в связи с этим, что и общее количество энергии, сообщаемое детали для нагрева до одной и той же температуры на частотах 2,4; 8 и 66 кГц будет также соответственно уменьшаться W_1 (площадь $\epsilon d1k0$) $< W_2$ (площадь $N d1k0$) $< W_3$ (площадь $M d1k0$).

Таким образом, для осуществления центробежного нанесения покрытия с применением наружного индукционного нагрева в целях обеспечения эффективности процесса наиболее целесообразно использовать оборудование низких (2,4 кГц) и средних (8 кГц) частот, обеспечивая при этом глубинный или поверхностный нагрев, определяемой зависимостью $0,2 \leq \delta_2 / X_k \leq 1$.

На рис.2 представлено распределение температур в стенке полого стального цилиндра (труба 100x10 и $\ell = 120$ мм) при внутреннем нагреве на частоте 2,4; 8 и 66 кГц.

Нетрудно заметить основную особенность внутреннего нагрева, сравнивая это распределение температуры с распределением температур на рис.1. Она состоит в том, что в отличие от наружного нагрева, где для достижения одной и той же температуры 800°C на внутренней стенке, наружную поверхность перегревают на 40, 120 и 250°C в зависимости от используемой частоты, тогда как при внутреннем нагреве на любой частоте такая необходимость перегрева исключается.

Ввиду указанной особенности внутреннего нагрева при применении малых глубин горячего проникновения токов и высоких частот (когда, например, $\delta_2 = 2$ мм; $\delta_2 / X_k = 0,2$ при $\nu = 66$ кГц), требуемая полезная энергия по сравнению с необходимыми затратами энергии в аналогичных условиях наружного нагрева сокращается в 1,5...2 раза. Это подтверждается сравнением площадей многоугольников $ab20$ на рис.1 и рис.2. При внутреннем нагреве существенно сокращаются и непроизводительные потери (заштрихованные части на рис. 1 и 2), а также вследствие этого и общие затраты энергии, передаваемые в деталь (площади $M d1k0$ на рис.1 и $M a1k10$ на рис.2). Поэтому внутренний нагрев полых заготовок на высокой частоте более целесообразен, чем наружный.

С повышением глубины горячего проникновения токов, например до 6,4 мм ($\epsilon_2 / X_k = 0,64$) при $\nu = 8$ кГц при внутреннем нагреве по сравнению с нагревом на частоте $\nu = 66$ кГц, возрастают затраты энергии на уже ненужный прогрев заготовки, графически отражаемый площадью $S abN$. Ненужные для осуществления процесса нанесения покрытия затраты энергии на нагрев заготовки еще больше увеличиваются при частоте $\nu = 2,4$ кГц и глубине проникновения токов $\delta_2 = 10$ мм ($\delta_2 / X_k = 1$). В сравнении с предыдущим нагревом на $\nu = 8$ кГц нагрев на частоте $\nu = 2,4$ кГц приводит к увеличению площади $S abN$ до площади $d abM$. Поэтому, как видим, внутренний нагрев на высокой частоте более эффективен, чем на низкой.

Эти соображения по обеспечению эффективности внутреннего нагрева следует применять при выборе частоты токов и соответствующих толщин заготовок. Необходимо, однако, помнить, что нанесение порошкового слоя заданной толщины при внутреннем нагреве, также как и при наружном, происходит, в основном, за счет теплопередачи от прогретых поверхностных объемов заготовки.

Таким образом, в процессах центробежного нанесения покрытий, осуществляемых с использованием внутреннего нагрева, наиболее целесообразен поверхностный (а не глубинный) вид нагрева.