

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ СПОСОБЕ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, А.В. Ишков,
С.М. Шанчуров, В.П. Тимошенко, Е.М. Таусенев

На основе представления системы деталь-индуктор через дискретные элементы осуществлено математическое моделирование тепловых процессов в деталях с переменным поперечным сечением, нагреваемых высокочастотным электромагнитным полем через третью краевую задачу теплопроводности для гомогенной изотропной среды. Численное решение задачи позволяет восстанавливать профили температуры в средних точках и на поверхности деталей прямоугольной, клиновидной и сложной форм, а также рассчитывать параметры индуктора и технологического процесса.

Ключевые слова: математические модели теплопроводности, комбинированный способ индукционной наплавки, распределение температуры.

Моделирование тепловых процессов при индукционной наплавке представляет собой сложную задачу для случаев, когда детали или заготовки имеют сложную геометрическую форму и переменную толщину вдоль и поперек упрочняемых участков. Разработка математической модели процесса индукционной наплавки таких деталей позволит теоретически оптимизировать режимы наплавки и создавать новые технологии, а также расширять номенклатуру наплавляемых деталей [1].

Известно несколько способов индукционной наплавки деталей сложной формы [2].

Так при дискретном способе индукционной наплавки осуществляется дозировка энергии по длине упрочняемой кромки. Энергия к каждой точке наплавляемой поверхности подводится циклически. Однако практическая реализация способа затруднена из-за сложности выбора значений технологических параметров. В связи с этим разработка математических моделей, описывающих технологические аспекты процесса индукционной наплавки, имеет большое практическое значение.

При наплавке комбинированным способом характер нагрева деталей определяется уже целым комплексом параметров: законом перемещения деталей внутри зоны действия электромагнитного поля индуктора, конструкцией индуктора, частотой и значением индук-

цируемого тока, а также материалом и формой деталей.

Целью настоящей работы являлось математическое моделирование тепловых процессов в детали переменного поперечного сечения при ее ТВЧ-нагреве в условиях реализации комбинированного способа индукционной наплавки.

Расчетно-экспериментальная часть

Расчет по полученным уравнениям математической модели, с учетом табличного задания функции теплового источника $\Phi(x)$, проводили для следующих исходных условий: материал заготовки - сталь 65Г, размер заготовки 17×100×5 мм, покрытие из наплавочной шихты, толщиной 3 мм, состоящей из 85 мас. % твердого сплава ПГ-С27 и плавящего боратного флюса для индукционной наплавки П-0,66 [3-4], индукционная наплавка на частоте 66 кГц ($Q_0 = 0,5 - 1,0$ кВт).

Численные расчеты выполняли на ПЭВМ в среде MathCad v. 11.0 по полученным уравнениям математической модели [5].

Адекватность модели оценивали, сопоставляя расчетные температуры в характерных точках профиля детали, а также на ее поверхности, со значениями, полученными экспериментально, при исследовании температурных полей с помощью пирометра Питон-102.

Образцы нагревали в медном петлевом водоохлаждаемом индукторе $\varnothing 20$ мм, подключенном к ВЧ-генератору ВЧГ 7-160/0,44 ($I_{ан.} = 10$ А, $I_{сет.} = 2,5$ А, $U_{ан.} = 10-12$ кВ, $Q_{вых.} = 160$ кВт).

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим комбинированный способ индукционной наплавки подробнее. В течение всего времени движения детали внутри индуктора в ее поверхностных слоях выделяется теплота под воздействием индуцируемых вихревых токов, тепловой эффект действия которых может быть представлен некоторой функцией источников F .

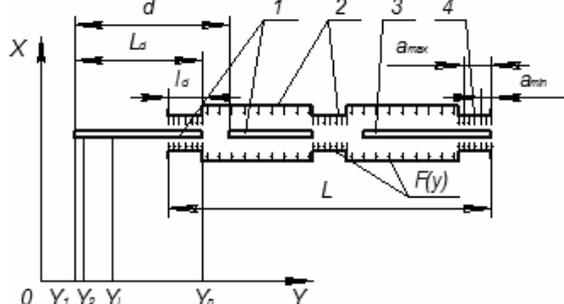


Рисунок 1 - Схема процесса индукционной наплавки деталей комбинированным способом

На рисунке 1 показано расположение деталей 1 с нанесенным слоем шихты 3 относительно токопроводов 2 индуктора в некоторый момент времени через слой расплава 4. Здесь же представлены и координатные оси. Предполагается, что ось Z направлена перпендикулярно плоскости чертежа. Если связать систему координат с индуктором и рассматривать любые точки деталей, находящихся в зоне его действия с фиксированными координатами x и z в фиксированный момент времени, то с каждой из этих точек может быть сопоставлена своя функция источников, которая запишется в виде $F = F(y)$, что в общем случае $F = F(x, y, z, t)$.

Пусть система координат будет связана с деталями. Деталь в направлении оси Y разобьем на n равных частей. Назовем эти части дискретными элементами. Проведем расчет для каждого участка отдельно.

Координатами границ участков являются Y_1, Y_2, Y_j, Y_n . Число элементов подбирается исходя из необходимой точности решения задачи и приемлемой длительности счета.

Условия нагрева каждого элемента прием зависящими только от начальных условий и функции источников и не зависящими от условий нагрева соседних элементов. Это

допущение обосновывают тем, что обычно длина деталей, наплавляемых комбинированным способом, в десятки раз и более превышает толщину.

Изменение характеристик рассматриваемой системы в направлении оси Z для простоты учитывать не будем.

Однако такой подход к расчету теплового поля внутри детали позволяет учитывать тепловые процессы, хотя и в редких случаях.

Таким образом, функция источников для отдельного элемента примет вид $F = F(x, t)$.

Алгоритм расчета электротепловых процессов в модели при известном начальном распределении температуры заключается в следующем:

- исходя из имеющегося температурного поля находят удельное электрическое сопротивление и магнитную проницаемость в каждом дискретном элементе области загрузки;
- исходя из положений деталей определяем распределение тепловых источников в деталях по длине индуктора $F(y)$;
- для каждого дискретного элемента загрузки определяем функции внутренних тепловых $F(x, t)$ источников и вычисляем температурное поле на текущем временном слое, определяемом шагом по времени τ ;
- исходя из принятого закона перемещения изделий фиксируем расположение деталей относительно индуктора на следующем временном слое.

Если критерии окончания процесса, определяемые технологом, например, достижение в заданной точке максимальной температуры, не удовлетворены, то происходит переход к первому пункту. В противном случае процесс вычислений прекращается.

На рисунке 2 приведен отрезок системы индуктор-загрузка, выделенный по границам одного элемента дискретизации с координатами точек разбиения y_j и y_{j+1} .

На поверхности наплавляемой детали 1 показан слой шихты 2. Распределение внутренних источников по длине индуцирующих токопроводов 3, а также функции внутренних источников в сечении $abcd$ могут быть с достаточной точностью установлены методом магнитных схем замещения [3].

Для каждого элемента считаем, что его магнитная проницаемость « μ » и удельное электрическое сопротивление « σ » постоянны во всех точках на данном временном слое. Такое допущение можно обосновать тем, что глубина проникновения тока для стальных деталей на применяемых частотах не пре-

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ СПОСОБЕ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

вышает 2-3 мм. В пределах этих величин изменение электрофизических свойств по глубине незначительно.

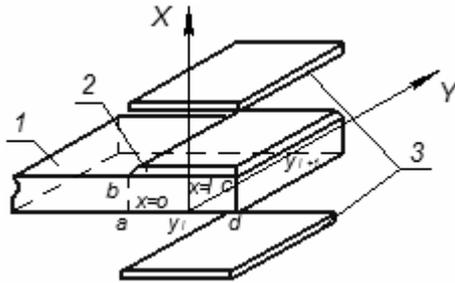


Рисунок 2 - Отрезок системы индуктор-нагрузка, выделенный по границе дискретного элемента

Глубина проникновения тока может быть рассчитана по известной формуле:

$$\Delta = (\rho, \mu, f) = \frac{10^3 \sqrt{10}}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (1)$$

где f – частота тока, Гц.

Частота тока в индукторе может быть принята постоянной для данного технологического процесса. Переменные « c » и « μ » должны на каждом временном слое определяться заново. Таким образом, функция глубины проникновения упростится и примет вид $\Delta(c, \mu)$.

Для часто встречающегося на практике случая, когда глубина проникновения тока в материал детали меньше ее толщины более чем в 2-2,5 раза, могут быть применены формулы для плоской электромагнитной волны, падающей на полуграниченное металлическое тело с плоской поверхности.

В этом случае удельная мощность источников на глубине Δ от поверхности детали, обращенной к индуктирующим проводам, будет:

$$\rho = \frac{1}{2} \rho \delta_{m\alpha}^2 e^{2\frac{\xi}{\Delta(c, \mu)}} \quad (2)$$

где δ – амплитуда плотности тока на поверхности нагреваемой детали, А/м²; $\Delta(c, \mu)$ – глубина проникновения тока в материал детали, м; ρ – удельное сопротивление, Ом·м.

Функция $\mu(H)$ должна определяться по конкретной кривой намагничивания для стали заданной марки. Для усредненной кривой намагничивания углеродистых сталей можно принять:

$$\mu(H) = 813H^{-0,894} \quad (3)$$

Для расчета температурного поля в дискретных элементах области загрузки запи-

шем третью краевую задачу теплопроводности для гомогенной изотропной среды, в виде следующей сводки формул (4):

$$T(x, 0) = T_c, 0 \leq x \leq 1, t = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f(x, t), 0 < x < 1, t > 0$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_c), x = 0, t \geq 0$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T - T_c), x = 1, t \geq 0$$

$$f(x, t) = \frac{F(x, t)}{C\gamma}$$

где a – температуропроводность материала детали; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); l – толщина детали на расчетном участке, м; T_c – температура окружающей среды, °С; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); d – плотность, кг/м³.

Такая задача может быть решена методом разделения переменных путем представления искомого решения в виде ряда Фурье по собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля с граничными условиями III рода [4].

Связь электромагнитного поля с температурным обусловлена зависимостью удельного сопротивления и магнитной проницаемости от температуры. Эта связь в модели поддерживается специальным порядком построения функций источников.

Разобьем весь временной интервал, в течение которого происходит нагрев j -того элемента дискретизации, на s временных отрезков. Индекс отдельного временного отрезка обозначим $i, i = 1, \dots, s$. Для каждого элемента функция источников на очередном временном отрезке вычисляем после проведения вычислений для всех предшествующих временных отрезков с учетом изменения свойств среды.

Таким образом, в процессе проведения численного эксперимента функция источников как бы достраивается, и для каждого последующего временного слоя расчет температурного поля проводится с новой функцией источников.

Выражение для $F(x, t)$ представляется кусочно-непрерывной функцией и может быть записано в следующем виде:

$$F(x, t) = \sum_{k=1}^s F_i(x) U [t - t_{i-1}, (t_i - t)] \quad (5)$$

где функция Хевисайда определяется выражением

$$U(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ 1, t \geq 0 \end{cases}$$

(s - число отрезков представления $F(x, t)$; $F(x, t)$ – непрерывная на всем исследуемом отрезке времени функция, отражающая характер изменения тепловых источников).

Для частного случая, когда электромагнитное поле воздействует с одной стороны нагреваемой пластины, с учетом выражения (1) получим

$$F_i(x) = \frac{1}{2} \rho_i \delta_{me}^2 e^{-\frac{2(l-x)}{\Delta i}} \quad (6)$$

Если нагрев двусторонний, как в примере на рис. 2, то выражение для функции источников можно записать следующим образом:

$$F_i(x) = \frac{1}{2} \rho_i \delta_{me}^2 \left(e^{-\frac{2(l-x)}{\Delta i}} + e^{-\frac{2x}{\Delta i}} \right) \quad (7)$$

И тогда

$$F_i(x, t) = \sum_{i=1}^s \frac{1}{2} \rho_i \delta_{me}^2 \left(e^{-\frac{2(l-x)}{\Delta i}} + e^{-\frac{2x}{\Delta i}} \right) \times$$

$$U[(t - t_{i-1})(t_i - t)] \quad (8)$$

В рассматриваемой модели технологического процесса при решении тепловой части задачи существует возможность учета влияния аллотропических превращений, происходящих в стали в процессе нагрева. Это можно сделать специальным выбором функций источников на каждом временном слое.

Влияние аллотропических превращений на изменение глубины проникновения тока и на зависимость удельной мощности от напряжения на индукторе учитывается в электрической части задачи при проведении расчета индуктора. Расчет индуктора в данной работе не рассматривается.

При разработке численной реализации модели использовали модульный принцип. Модель содержит блоки электрического расчета, теплового расчета, а также информационно-логический блок [5].

Модель позволяет рассчитать температурное поле в системе на разных этапах технологического процесса и получать информацию о потреблении энергии от внешнего

источника питания и выделении ее в нагрузку.

Варьируя геометрические размеры индуктора, форму и закон перемещения деталей, мощность, потребляемую от генератора, можно определить наиболее благоприятные технологические параметры процесса с точки зрения экономичности, производительности и качества изделий. При этом граница начала плавления шихты должна выбираться на некотором расстоянии от выходной кромки индуктора в диапазоне от a_{min} до a_{max} (рис. 1).

Границы этого диапазона рассчитывают исходя из принятого закона перемещения деталей и жесткости режима нагрева и из условия обеспечения требуемого времени протекания металлургических процессов в плавящейся шихте.

В качестве примера приведем результаты применения модели для разработки технологического процесса индукционной наплавки односторонних лап культиваторов С.1.7 сплавом ПС-14-60 ($T_{пл} = 1150$ °С).

В качестве примера технологического оборудования в расчете принимали высокочастотный генератор ВЧГ 7-160/0,44 с номинальной колебательной мощностью 160 кВт и частотой 440 кГц. Длину зоны действия электромагнитного поля индуктора выбирали в диапазоне от минимального L_{min} до максимального L_{max} значений по формулам: $L_{min} = m_d + l_d$; $L_{max} = d(n + 1) + l_d - L_d$, (где d - шаг расположения деталей на транспортирующем устройстве, м; L_d - длина наплавляемого участка детали, м; l_d - длина утолщенной части наплавляемого участка, м; m - число деталей, находящихся во время остановов в индукторе). Исходные значения следующие: $d = 0,45$ м; $L_d = 0,4$ м; $l_d = 0,1$ м.

Получено при расчете: $m = 2$; длина индуктора $L = 1,025$ м; время передвижения деталей на один шаг - 9 с; время остановов - 4 с; время, затрачиваемое на наплавку одной лапы - 12 с.

Расчетные размеры индуктора в зонах интенсифицированного нагрева следующие: зазор между токопроводами - 20 мм, ширина токопроводов - 25 мм, для остальной части зоны - 30 и 35 мм, соответственно.

Расстояние от выходной кромки индуктора до границы плавления шихты принято считать равным 30-40 мм.

Затраты электроэнергии на одну деталь (без учета потерь в генераторе) - 0,64 кВт·ч.

Технологически весь процесс наплавки при найденных оптимальных условиях необ-

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ СПОСОБЕ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

ходимо проводить при стабилизированном токе индуктора и анодном напряжении генератора в интервале 9,5-10,5 кВ. Сигнал, пропорциональный току индуктора, необходимо снимать с применением специальной системы измерения тока [6], а затем подавать на блок управления генератором для его стабилизации по току индуктора.

На рисунке 3 приведены температурные кривые, полученные расчетом для установившегося режима системы для средних точек поверхности двух дискретных элементов, выделенных в утолщении (кривая 1) и в более тонкой части (кривая 2).

На рис. 4 приведены расчетные кривые, задаваемые в виде кусочно-постоянных функций изменения плотности внутренних тепловых источников $F(x, t)$ при $x = 0$, действующих в утолщенной (кривая 1) и более тонкой (кривая 2) частях реальной детали.

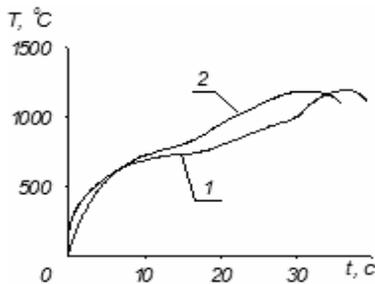


Рисунок 3 - Изменение температуры в средних точках поверхности: 1, 2 - дискретные элементы

Эти кривые при описанной выше технологической схеме процесса индукционной наплавки, как следует из расчетов, соответствуют наиболее благоприятному выбору всей совокупности управляющих параметров.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что для рассматриваемого случая отклонение вычисляемых значений технологических параметров от экспериментальных не превышает 10-16%.

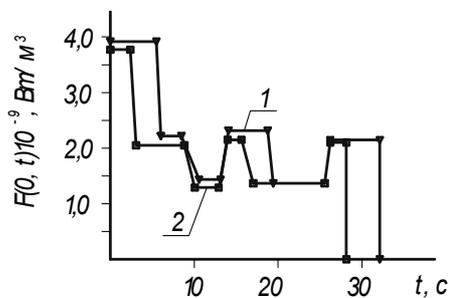


Рисунок 4 - Изменение плотности внутренних тепловых источников при наплавке односторонних лап культиваторов С.1.7

Связь электромагнитного поля с температурными полями в детали устанавливается зависимостью удельного сопротивления и магнитной проницаемостью поверхностного слоя упрочняемых деталей от температуры и поддерживается специальным порядком построения функций внутренних тепловых источников.

Тогда для каждого элемента разбиения области загрузки индуктора функция тепловых источников на очередном временном слое вычисляется после проведения вычислений для всех предшествующих временных слоев с учетом изменения свойств среды.

Таблица 1 - Экспериментальные расчетные значения температуры на границе шихты металла

у, мм	$T_{расч.}, °C$	$T_{эксп.}, °C$	$\Delta T, °C$	$\Delta T_{отн.}, \%$
0	1040	1100	60	5,5
40	1040	1080	40	3,7
80	1040	1090	50	4,6
120	1040	1050	10	0,9
160	1040	1020	20	1,2
200	1040	1030	10	1,0
240	1040	1070	30	2,8
280	1040	1160	120	10,3
320	915	940	25	2,7
360	915	960	45	4,7
400	915	945	30	3,2

В табл. 1 приведены экспериментальные, полученные по методике работы [7], и расчетные значения температуры в точках поверхности детали на границе металл-шихта, соответствующие границам дискретных элементов, при суммарном времени нагрева для каждого рассчитываемого участка, равного 20 с.

Таким образом, в процессе проведения численного эксперимента функция тепловых источников как бы достраивается, и для каждого последующего временного слоя расчет температурного поля проводится с новой функцией тепловых источников.

Полученная модель может применяться и для разработки технологических процессов индукционной наплавки лемехов, односторонних и стрельчатых лап культиваторов, ножей и других деталей переменного сечения [1-2].

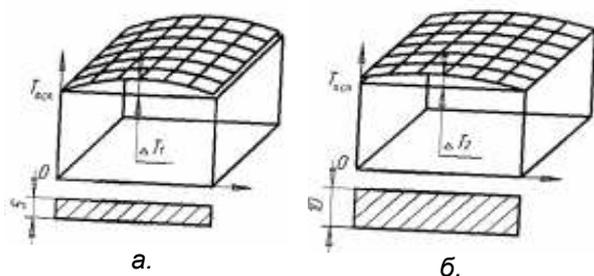


Рисунок 5 - Характер распределения температуры на упрочняемой поверхности на деталях, имеющих различную толщину:

- а - тонкие детали (до 6 мм);
- б - толстая деталь (10 мм и более)

В качестве примера нами исследовался процесс индукционной наплавки тонких деталей от 4 до 7 мм и толщиной от 7 до 20 мм., а также соответствующие температурные профили (рис. 5-6).

Оказалось, что для плоских деталей, максимальная температура создается в центре участка ($\Delta T_1, \Delta T_2$) упрочняемой поверхности (рис. 5). Однако, как следует из рис. 5, температуры отличаются с торцевой части и там, где соприкасается нагреваемая поверхность с оставшейся частью изделия.

По результатам проведенных нами экспериментальных исследований температуры на упрочняемой поверхности изделия имеющего переменное сечение, можно предсказать ожидаемый перегрев твердого сплава как в тонкой части детали, так и в толстой, там где происходит соприкосновение упрочняемой поверхности и основного металла.

Так, например, в случае, когда упрочняющая поверхность по сечению имеет форму клина, температурное поле значительно изменяется. У тонкой части детали максимальные температуры возникают на острие клина (ΔT_3) и имеют значительные градиенты по краю ΔT_4 .

В процессе же ТВЧ-нагрева при реализации индукционной наплавки комбинированным способом температура поверхности детали, имеющей сложное переменное сечение как вдоль, так и поперек нагреваемого участка, изменяется в толстой, средней и тонкой частях по-разному (рис. 6), но общий ход зависимости совпадает с профилями температур, приведенными на рис. 5.

В начальный период процесса (до точки Кюри) нагрев тонкой части происходит быстрее. Это обусловлено толстой частью детали, в которую отводится тепло нагреваемого верхнего слоя. Изменение температуры в

других частях детали происходит до тех пор, пока верхний слой не прогреется до температуры слоя, соприкасающегося с наплавочной шихтой детали.

В интервале высоких температур отстает нагрев тонкой части из-за больших потерь на излучение. Поэтому разность между излучаемой и получаемой энергией уменьшается. В связи с этим средняя часть поверхности детали нагревается до более высокой температуры, чем тонкая.

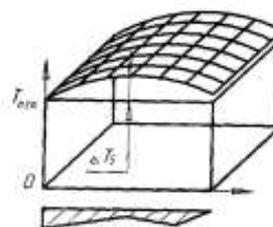


Рисунок 7 - Нагрев поверхности детали сложного профиля с переменным сечением

Максимальная температура при нагреве подобных деталей достигается в средней части ΔT_5 , а не в тонкой.

Реально наблюдаемая неравномерность нагрева детали, упрочняемой комбинированным способом индукционной наплавки, усугубляется также и значительными отклонениями в толщине периодического проката, из которого изготавливаются рабочие органы сельскохозяйственных машин и корблением неравномерно прогретой заготовки. Поэтому обеспечить равномерность ТВЧ-нагрева всех участков деталей сложной формы в индукторе практически невозможно [7].

Выводы

1. На основе решения третьей краевой задачи теплопроводности для гомогенной изотропной среды с помощью метода разделения переменных, путем представления искомого решения в виде ряда Фурье по собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля с граничными условиями III рода, разработана математическая модель тепловых процессов в деталях с переменным поперечным сечением, нагреваемых высокочастотным электромагнитным полем.

2. При представлении системы деталь-индуктор конечными элементами с заданными размерными параметрами удалось получить профили изменения температуры в средних точках и на поверхности деталей типа параллелепипеда и клина в виде кусочно-постоянных функций изменения плотности внутренних тепловых источников, действующих

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЕТАЛЯХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ СПОСОБЕ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

щих как в утолщенной, так и более тонкой его частях.

3. С помощью разработанной модели проведен пробный расчет параметров технологического процесса индукционной наплавки односторонних лап культиваторов С.1.7 сплавом ПС-14-60 ($T_{пл} = 1150$ °С).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-98016-р_сибирь_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большой А.А., В.Н. Коваль, В.П. Тимошенко и др.* Оптимизация процесса индукционной наплавки. // Известия СО АН СССР. Сер. Техн. науки. - 1985. - № 10. - Вып. 2. - С. 86-82.
2. *Иванайский В.В., Ахмедзянов Р.К.* Упрочнение деталей сельхозмашин и тракторов методом индукционной наплавки. Обзор. -М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1989. -Вып. 6.
3. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. -Л.: Энергоиздат; Ленинградское отд-ние, 1988.
4. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: уч. пособие. -М.: Высшая школа, 1985.
5. *Дьяконов В. П.* MathCad 11/12/13 в математике: справочник. -М.: Телеком, 2007.

6. *Тимошенко В.П., Каплинский А.Е., Сонин В.Г. и др.* Измерение тока индуктора при индукционной наплавке. -М.: ЦНИИТракторосельхозмаш, 1987. -Вып. 14.

7. *Иванайский В.В.* Физико-химические и технологические основы управления структурой и свойствами защитного износостойкого покрытия на рабочих органах сельхозмашин. -Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010.

Иванайский В.В. к.т.н., доцент
(3852)-62-83-80;

Кривочуров Н.Т. к.т.н., доцент;

Таусенев Е.М. к.т.н., ассистент

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет им. И.И. Ползунова»;

Шанчуров С.М. д.т.н., профессор,
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный экономический университет» г. Екатеринбург;

Ишков А.В. д.т.н., профессор,

Тимошенко В.П. к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»