

УДК 517.977.56, 519.6, 621.785

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО КРИТЕРИЮ ОБРАЗОВАНИЯ МИНИМУМА ОКАЛИНЫ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

Ю.Э. Плешивцева, А.В. Попов, Д.А. Дадабаева¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: yulia_pl@mail.ru, antonsam93@mail.ru, vertyankinad02@gmail.com

Аннотация. Эффективность производственных процессов термической обработки металлических полуфабрикатов оценивается с помощью различных показателей, к которым преимущественно относятся производительность, энергопотребление, качество готовых изделий. Повышение каждого из них возможно с помощью оптимизации процесса по соответствующему интегральному критерию. Конечное качество изделия, изготовленного из сплавов с высоким содержанием железа, после завершения термообработки во многом зависит от потерь металла в окалину, которая неизбежно образуется при высокоинтенсивном нагреве в индукционной установке. В связи с этим для снижения процента выбракованных изделий необходимо найти оптимальный режим работы индуктора, минимизирующий указанные потери. Статья посвящена оптимизации процесса сквозного индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед последующими операциями пластической деформации. В качестве объекта управления с распределенными параметрами рассматривается двумерная численная модель процесса индукционного нагрева, построенная в программном пакете Altair FLUX. Сформулированы задачи управления, оптимального по критериям быстродействия, минимального энергопотребления и минимума потерь металла в окалину. Решение сформулированных задач оптимального управления после их параметризации и редукции к задачам полубесконечной оптимизации может быть получено с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации объектов с распределенными параметрами. В качестве примера для задачи на минимум образования окалины на основе альтернансного метода записана система трансцендентных уравнений, замкнутая относительно всех неизвестных параметров процесса нагрева, решение которой производится с помощью автоматизированной процедуры, разработанной в программном пакете MATLAB. Анализ полученных численных результатов показал, что решение данной однокритериальной задачи позволяет существенно сократить количество образующейся окалины при существенном увеличении времени процесса по сравнению



© Автор(ы), 2025

¹ Юлия Эдгаровна Плешивцева, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Антон Валерьевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Дарья Александровна Дадабаева, студент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

с задачами быстрогодействия и минимального энергопотребления, поэтому для одновременного учета нескольких типовых показателей качества на следующих этапах исследования планируется перейти к решению многокритериальной задачи.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, оптимальное управление, альтернативный метод, минимум окалинообразования, численная модель, Altair FLUX, MATLAB.*

Введение

В настоящее время технология индукционного нагрева (ИН) активно развивается и находит применение в различных областях промышленности и энергетики. В частности, в машиностроении эта технология используется для поверхностного упрочнения и плавки деталей, а также для предварительного нагрева перед последующими операциями пластической деформации. Кроме того, ИН может заменить традиционный электронагрев при паровом риформинге в процессах производства водорода, переработки отходов и в различных других промышленных технологиях. Популярность технологии ИН обусловлена ее важными преимуществами перед другими традиционными методами термической обработки, к которым прежде всего относятся энергоэффективность, скорость, точность регулирования конечной температуры при термообработке деталей, возможность автоматизации процесса, экологичность, безопасность и многие другие существенные факторы, облегчающие использование ИН.

В условиях высокой конкуренции и постоянно повышающихся требований к эффективности производственных процессов актуальными задачами в промышленности на сегодняшний день становятся повышение качества изделий, увеличение производительности и снижение издержек. Решение этих задач применительно к процессам индукционного нагрева связано с оптимизацией конструкции применяемых установок или режимов их работы по соответствующим критериям качества. Типовыми критериями, влияющими на производительность процессов термообработки металла, являются быстродействие и минимум энергопотребления. Кроме этого, в [1, 2] показано, что при высокотемпературной обработке стальных заготовок одним из параметров, существенно влияющим на качество готового изделия, является количество образующейся в процессе нагрева окалины. Поэтому для общего повышения эффективности термической обработки стальных полуфабрикатов перед операциями пластической деформации необходимо применять режимы работы индукционного нагревателя, которые являются оптимальными по критериям максимального быстродействия, минимального потребления энергии и минимального образования окалины.

В статье формулируются задачи оптимизации процесса ИН стальных заготовок по указанным критериям качества. Показывается, как задача минимизации количества образования окалины решается с помощью альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [3]. Этот метод позволяет после редукции исходной задачи оптимального управления к задаче математического программирования свести ее к решению системы трансцендентных уравнений, замкнутой относительно всех искомых параметров процесса ИН. Данная система уравнений решается с помощью специализированной процедуры, построенной в программном пакете MATLAB [4]. Температурные распределения для решения системы уравнений рассчитываются с помощью численной двумерной модели процесса ИН, разработанной в конечно-элементном пакете Altair FLUX.

Постановка задачи оптимального управления

Процесс ИН стальных цилиндрических заготовок, рассматриваемый в работе в качестве объекта управления с распределенными параметрами (ОРП), описывается взаимосвязанной системой нелинейных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей [5]:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma(T) \bar{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \bar{E} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} c(T) \gamma(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial r} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial l} \right) + \frac{1}{\sigma(T)} \left(\frac{\partial H(r, l, t)}{\partial r} \right)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(r, l, t) = T(r, l, 0) = T_0(r, l) = T_0 = \text{const}, \quad l \in [0; L], \quad r \in [0; R], \quad (6)$$

$$\frac{\partial H(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad H(R, l, t) = H_L; \quad H(r, 0, t) = H_{R1}; \quad H(r, L, t) = H_{R2}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad \lambda(T) \frac{\partial T(R, l, t)}{\partial r} = \alpha(T) (T(R, l, t) - T_a); \quad (8)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial l} = \alpha(T) (T(r, 0, t) - T_a); \quad \lambda(T) \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial l} = \alpha(T) (T(r, L, t) - T_a). \quad (9)$$

Здесь $\bar{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; $\bar{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; T – температура; $c(T)$, $\gamma(T)$, $\lambda(T)$ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла соответственно; t – время; $r \in [0; R]$, $l \in [0; L]$ – соответственно радиальная и продольная пространственная координаты; T_a – температура окружающей среды; $\alpha(T)$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; R – радиус и L – длина заготовки.

Состояние объекта управления с распределенными параметрами, описываемого уравнениями (1) – (5) с краевыми условиями (6) – (9), характеризуется пространственно-временным распределением температуры $T(r, l, t)$ по объему нагреваемой детали. В качестве управляющего воздействия выбирается напряжение источника питания индукционной нагревательной установки $u(t)$, на которое накладывается ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max}; \quad t \in [0; t^0]. \quad (10)$$

Требования к конечному состоянию объекта управления формулируются с помощью задания максимальной абсолютной величины ε_0 отклонения температуры $T(r, l, t^0)$ в конце процесса нагрева при $t = t^0$ от требуемого значения T^* :

$$\max_{\substack{r \in [0, R] \\ l \in [0, L]}} |T(r, l, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0. \quad (11)$$

В качестве критериев оптимальности рассматриваются интегральные функционалы:

$$I_1 = \int_0^{t^0} dt = t^0 \rightarrow \min, \quad (12)$$

$$I_2 = \int_0^{t^0} u(t) dt \rightarrow \min. \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) соответствуют критериям максимального быстродействия и минимального потребления энергии соответственно.

Как показано в [1, 2, 6], интенсивность процесса окисления металла при высокотемпературном нагреве существенно зависит от температуры поверхности нагреваемой детали. При этом наибольшая активность образования окалины при обработке стальных заготовок наблюдается при превышении некоторой характерной температуры T_q , которая зависит от марки стали и приводится в справочной литературе. Таким образом, критерий минимума образования окалины может быть записан следующим образом:

$$I_1 = \int_0^{\varphi^0} f(\theta_{\text{нов}}) d\varphi \rightarrow \min, \quad (14)$$

где кусочно-непрерывная функция $f(\theta_{\text{нов}})$ имеет следующий вид:

$$f(\theta_{\text{нов}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \theta_{\text{нов}} < \theta_q \\ (\theta_{\text{нов}} - \theta_q)^{s+1}, & \text{если } \theta_{\text{нов}} \geq \theta_q. \end{cases} \quad (15)$$

Следует отметить, что выражения (14) и (15) записаны для безразмерных значений температуры поверхности $\theta_{\text{нов}}$, температуры начала процесса интенсивного окалинообразования θ_q , а также времени процесса φ , переход к которым от абсолютных значений осуществляется с помощью следующих соотношений:

$$\theta(x, y, \varphi) = \frac{T(r, l, t) - T_0}{P_{\text{max}} R^2} \lambda, \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{at}{R^2}, \quad (17)$$

где a – коэффициент температуропроводности нагреваемого металла; P_{max} – максимальная удельная мощность внутреннего тепловыделения на единицу объема нагреваемой детали.

Таким образом, в общем случае задача оптимального управления процессом ИН сводится к поиску такого закона изменения сосредоточенного управляющего воздействия $u^*(t)$, стесненного ограничением (10), который переводит ОРП, описываемый уравнениями (1) – (5) с краевыми условиями (6) – (9), из заданного

начального (6) в требуемое конечное состояние (11) с минимальным значением критерия оптимальности (12) в случае решения задачи оптимального быстрогодействия, (13) – для задачи минимального энергопотребления и (14) – для задачи на минимум потерь металла в окалину.

Сформулированные задачи могут быть решены с помощью альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами.

Решение задачи оптимального по критерию минимума образования окалины управления на основе альтернансного метода

Поскольку в [5, 7, 8] подробно описана методика решения задач оптимального управления по критериям быстрогодействия и минимума энергопотребления на базе альтернансного метода, далее будет подробно рассмотрено решение задачи оптимального по критерию минимума окалинообразования управления. Ограничимся заданием требуемых температурных кондиций (11) только для поперечного сечения заготовки при $l = \frac{L}{2}$, считая неравномерность температурного распределения по длине заготовки несущественной.

Согласно теории оптимального управления системами с распределенными параметрами [9], общее время процесса нагрева t^0 в задаче минимизации окалины считается заранее известным. Отсюда очевидно, что для достижения минимально возможного количества окалины температура поверхности заготовки $\theta_{\text{пов}}$ должна, с одной стороны, как можно меньше отклоняться от температуры начала интенсивного окалинообразования θ_q , а с другой – обеспечивать достижение требуемых температурных кондиций (11) в конечный момент времени. Интервалы нагрева детали с максимально допустимым значением напряжения $u(t) = u_{\text{max}}$, применяемые в оптимальных по быстроддействию и энергопотреблению режимах, не удовлетворяют указанным условиям, поэтому закон изменения управляющего воздействия должен иметь отличный от типового релейного характера вид.

В [2, 5] показано, что в случае, когда требуемая температура в конце процесса индукционного нагрева θ^* превышает θ_q , минимальные потери металла в окалину достигаются при изменении температуры поверхности по экспоненциальному закону:

$$\theta_{\text{пов}}(\varphi) = Ae^{B\varphi} + \theta_q, \quad (18)$$

где A – определяемая начальной температурой константа ($A > 0$); B – определяемая известными параметрами модели константа ($B > 0$).

Согласно теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, оптимальное по критерию быстрогодействия (12) и минимума энергопотребления (13) управление $u^*(t)$ процессом индукционного нагрева представляет собой релейную функцию, то есть кусочно-постоянную функцию времени, попеременно принимающую свои предельно допустимые, согласно ограничению (10), значения.

Ввиду ряда условий, подробно описанных в [5], обеспечить изменение температуры поверхности по закону (18) в течение всего процесса нагрева, используя типовые релейные алгоритмы управления, невозможно. Однако достаточно

изменить управляющее воздействие не на всем интервале $t \in [0; t^0]$, а лишь на так называемом особом участке, на котором температура поверхности превышает температуру интенсивного окалинообразования. При этом нагрев детали до $\theta_{нов} = A + \theta_q$ на первом интервале управления осуществляется при максимально допустимом значении управляющего воздействия, как и в случае задачи оптимального быстрогодействия. Таким образом, алгоритм управления в рассматриваемой задаче при заранее известном времени t^0 представляет собой кусочно-непрерывную функцию следующего вида:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, & 0 \leq t < t_n; \\ u_{oc}(t), & t_n \leq t \leq t_k; \\ 0, & t_k \leq t \leq t^0, \end{cases} \quad (19)$$

где $u_{oc}(t)$ – управление на особом участке $[t_n; t_k]$.

Наличие в программе управления особого участка значительно усложняет задачу поиска оптимального по окалинообразованию управления. В [5] показано, что выражение для функции $u_{oc}(t)$, которое выводится на основе закона (18), зависит от ряда коэффициентов, рассчитываемых на базе аналитической модели процесса. При этом анализ результатов решения задачи с использованием аналитической модели показывает, что экспонента на особом участке управляющего воздействия возрастает медленно и может быть аппроксимирована прямой без существенной потери точности. Поэтому с целью упрощения оптимизационной процедуры целесообразно рассмотреть алгоритм управления с заданным постоянным напряжением на особом участке $u_{oc} = \text{const}$, $u_{oc} < u_{\max}$. Таким образом, при известных значениях $u_{\max}$, u_{oc} , t^0 управляющее воздействие $u^*(t)$ оказывается параметризованным, т. е. заданным с точностью до значения параметров t_n , t_k , и тем самым исходная задача оптимального управления редуцируется к задаче математического программирования (ЗМП). Полученная ЗМП на минимум функционала качества (14) в условиях ограничений вида (11) принимает вид:

$$\begin{cases} I = \int_0^{t^0} f(\theta_{нов}(t_n, t_k)) d\varphi \rightarrow \min_{t_n, t_k}, \\ \max_{\substack{r \in [0, R] \\ l = L/2}} |T(r, l, t_n, t_k) - T^*| \leq \varepsilon_{\min}^{(2)}. \end{cases} \quad (20)$$

Согласно альтернансному методу, число N оптимизируемых параметров алгоритма управления в ЗМП (20) однозначным образом связано с предельно достижимым значением точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ в классе рассматриваемых управляющих воздействий. Согласно (19), оптимизируемыми параметрами являются t_n , t_k , т. е. $N = 2$, а точность нагрева $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ представляет минимально возможное, достижимое в классе двухпараметрических управлений отклонение температуры от требуемого значения, оцениваемое в равномерной метрике.

Согласно теории альтернансного метода, результирующее температурное распределение по центральному сечению заготовки в конце оптимального процесса имеет $N + 1 = 3$ точки с максимальным отклонением температуры от требуемого значения, равным $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ (рис. 1). Очевидно, что второй экстремум по

температуре достигается в некоторой внутренней точке радиального сечения, координата которой является дополнительной неизвестной, для отыскания которой можно использовать необходимые условия существования экстремума. Таким образом, зная форму температурной кривой (см. рис. 1), можно сформировать систему уравнений, которая оказывается замкнутой относительно всех неизвестных процесса, к которым относятся t_n , t_k , r_1^0 , $\varepsilon_{\min}^{(2)}$:

$$\begin{cases} T(0, t_n, t_k) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T(r_1^0, t_n, t_k) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T(R, t_n, t_k) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial (T(r_1^0, t_n, t_k) - T^*)}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (21)$$

При решении полученной системы уравнений (21) значения температуры $T(r, t)$ рассчитываются с помощью численной модели, разработанной в программном пакете Altair FLUX. Решение подобной сложной нелинейной системы возможно только численными методами с помощью специализированных программных пакетов. В работе для этих целей используется подробно описанная в [10–12] процедура оптимизации, разработанная в пакете MATLAB.

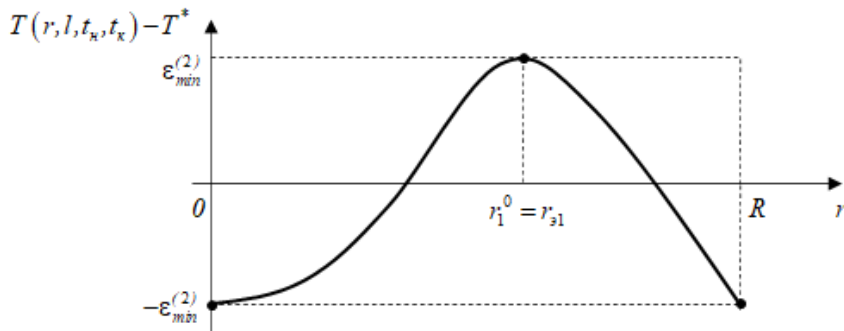


Рис. 1. Форма конечного температурного распределения по центральному сечению для предельно достижимой точности $\varepsilon_{\min}^{(2)}$

Результаты решения задачи оптимального по критерию минимума потерь металла в окалину управления

В качестве модели объекта управления в работе рассматривается численная двумерная модель индукционного нагрева, построенная в пакете Altair FLUX [13], верифицированная на основе экспериментальных данных, полученных на лабораторной нагревательной индукционной установке. Исходные данные для построения модели приведены в табл. 1.

Вид модели со сгенерированной конечно-элементной сеткой показан на рис. 2. Валидация разработанной модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными приведена в [10].

Как было показано ранее, напряжение особого участка управляющего воздействия считается постоянным и принимается равным $u_{oc} = 260$ В из условия изменения температуры поверхности по закону вида (18) при $u_{\max} = 300$ В,

$t^0 = 451$ с. Разработанная модель электромагнитного и температурного полей в процессе ИН была интегрирована в автоматизированную процедуру оптимизации в пакете MATLAB, реализующую решение системы (21).

Таблица 1

Исходные данные для построения модели

Параметр	Значение
Частота питающего тока, Гц	125 000
Требуемая температура заготовки, °С	1 200
Температура окружающей среды, °С	25
Начальная температура заготовки, °С	25
Количество витков индуктора	5
Радиус заготовки, м	0.05
Длина заготовки, м	0.095
Расстояние между индуктором и заготовкой, м	0.005
Расстояние между витками индуктора, м	0.005
Геометрические размеры витка индуктора, м	0.006×0.012
Конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ×гр	2
Коэффициент теплообмена излучением, Вт/м ² ×гр	0,85
Максимальное напряжение источника питания, В	300
Материал заготовки	Сталь (С40) [14]

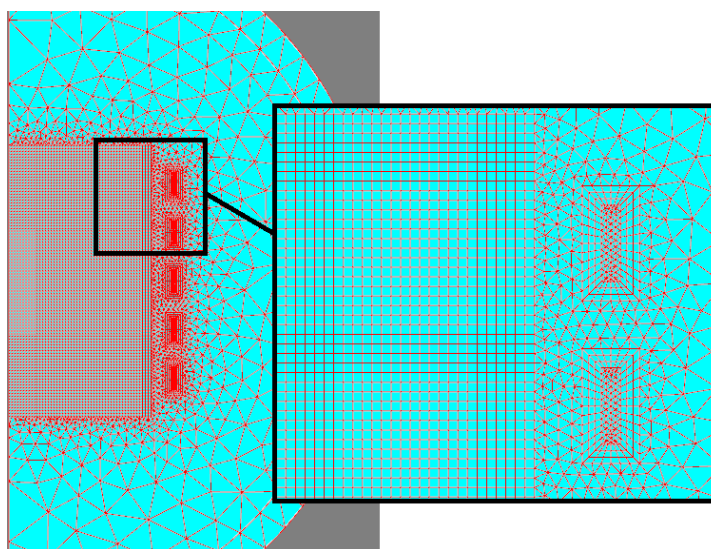


Рис. 2. Геометрия FLUX-модели со сгенерированной сеткой

В результате расчетов получены значения оптимальных параметров процесса, представленные в табл. 2. Оптимальный алгоритм управления, а также результирующее температурное распределение по радиальному сечению заготовки показаны на рис. 3.

Для анализа полученных результатов с помощью автоматизированной процедуры оптимизации были решены задачи оптимального по критериям быстрого действия и минимума энергопотребления управления. Из теории альтернансного метода известно, что для предельной точности нагрева в классе задач с двумя

оптимизируемыми параметрами алгоритмы управления оптимальные по быстродействию и энергопотреблению совпадают и формируют универсально-оптимальный алгоритм.

Таблица 2

Результаты решения задачи на минимум потерь металла в окалину

Параметр	t_n , с	t_k , с	$\varepsilon_{\min}^{(2)}$, °C	I
Значение	70	432	26	$8.3 \cdot 10^{-6}$

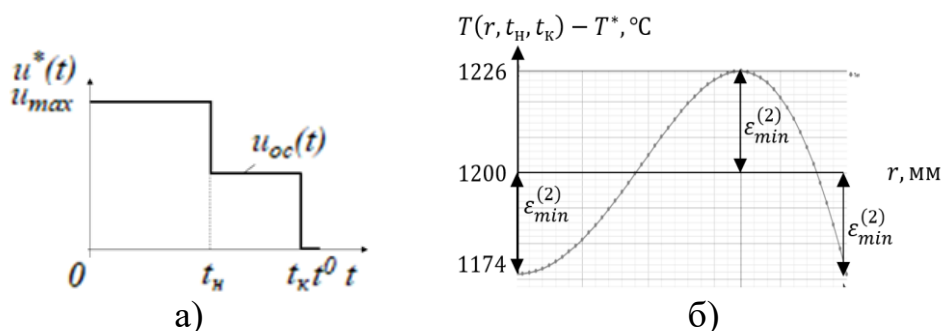


Рис. 3. Результаты решения задачи минимизации окалинообразования: а – алгоритм управления; б – радиальное температурное распределение

В табл. 3 представлены результаты решения задачи оптимального управления по критериям быстродействия и минимального потребления энергии при $u_{\max} = 300$ В. В данном случае, как показано в [5], оптимизируемыми параметрами являются длительности интервала нагрева и выравнивания температуры Δ_1 и Δ_2 . Оптимальный алгоритм управления, а также результирующее температурное распределение по радиальному сечению заготовки показаны на рис. 4.

Таблица 3

Результаты решения задач оптимального быстродействия и энергопотребления

Параметр	Δ_1 , с	Δ_2 , с	$\varepsilon_{\min}^{(2)}$, °C	I
Значение	316	26	29	$9.1 \cdot 10^{-6}$

Анализ полученных результатов однозначно показывает, что использование алгоритма управления, оптимального по критерию минимума образования окалины, позволяет сократить на 10 % количество окисленного металла по сравнению с типовым универсально-оптимальным по критериям быстродействия и энергопотребления алгоритмом. При этом очевидно, что общее время, затраченное на нагрев, существенно выше, чем в задачах оптимального быстродействия и минимального энергопотребления. Максимальное отклонение от требуемого значения температуры по радиальному сечению заготовки в обоих случаях оказывается меньше 30 °C, что удовлетворяет требованиям производственных процессов термической обработки стали.

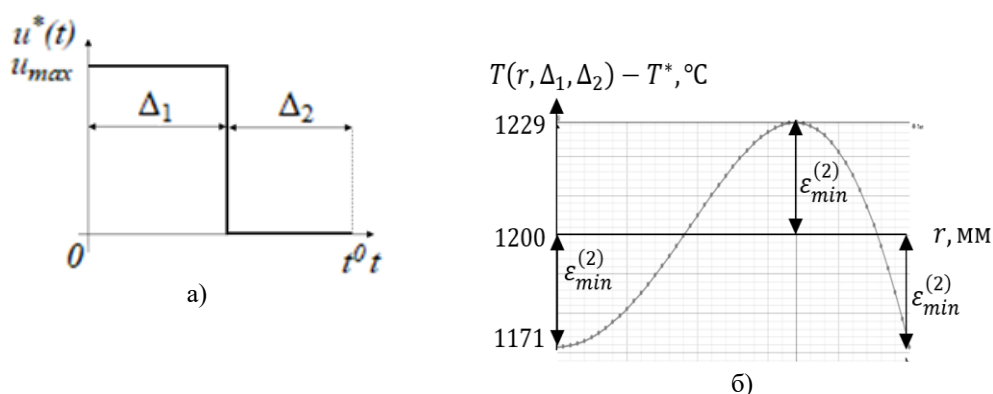


Рис. 4. Результаты решения задачи оптимального быстрогодействия и минимума энергопотребления: а – алгоритм управления; б – радиальное температурное распределение

Заключение

В работе сформулирована задача оптимального управления процессом периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед последующими операциями пластической деформации по критериям быстрогодействия, минимального энергопотребления и минимума потерь металла в окалину. Подробно рассмотрена методика решения задачи минимизации окалины на базе альтернансного метода. Сформулированные задачи были решены с помощью специализированной оптимизационной процедуры, построенной в пакете MATLAB с интегрированной численной моделью процесса, разработанной в Altair FLUX. Проведено сравнение результатов решения задачи оптимального управления по критерию минимума окалинообразования с результатами решения задач быстрогодействия и энергопотребления. Применение алгоритма управления, оптимального по критерию минимального окисления, позволяет сократить на 10 % потери металла в окалину по сравнению с алгоритмом оптимальным по критериям быстрогодействия и энергопотребления. На следующем этапе исследований планируется сформулировать и решить многокритериальную задачу оптимального управления процессом ИН относительно всех рассмотренных в работе типовых критериев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ващенко А.И., Зеньковский А.Г., Лифшиц А.Е. и др. Окисление и обезуглероживание стали. М.: Металлургия, 1972. 336 с.
2. Малый С.А. Экономичный нагрев металла. М.: Металлургия, 1967. 191 с.
3. Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с. ISBN: 5-02-013069-9. EDN: TTRVMB
4. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения: 01.04.2025).
5. Рапопорт Э.Я., Плевшвицева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с. ISBN: 978-5-02-037501-7. EDN: QNDGWJ
6. Северденко В.П., Макушок Е.М., Раввин А.Н. Окалина при горячей обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
7. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 279 с.
8. Плевшвицева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2014. № 2 (42). С. 148–163. EDN: TFLHDT

9. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 678 с. ISBN: 978-5-06-006054-6. EDN: QMTFRZ
10. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2020. 24 с. EDN: WNMWOX
11. *Попов А.В., Плещивцева Ю.Э.* Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной закалки стальных заготовок // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. Т. 29. № 2. С. 129–144. DOI: 10.14498/tech.2021.9. EDN: BLOVES
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences. 2016. Vol. 29. P. 02033. DOI: 10.1051/shsconf/20162902033. EDN: WHEUKL
13. Flux [Электронный ресурс]. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения: 01.04.2025).
14. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 1985. 568 с.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025

OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING OF STEEL WORKPIECES WITH RESPECT TO MINIMAL SCALE FORMATION CRITERIA

Yu.E. Pleshivtseva, A.V. Popov, D.A. Dadabaeva¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: yulia_pl@mail.ru, antonsam93@mail.ru, vertyankinad02@gmail.com

Abstract. Efficiency of heat treatment production processes of metals is measured by different characteristics, including productivity, energy consumption and quality of end product. Increasing each of them is possible through optimization with respect to corresponding integral criteria. The quality of end product, which is made of high iron alloys, after heat treatment operations depends on metal loss to scale, that is inevitably formed during high-intensity heating in induction installation. Thus, to reduce the amount of defective details it is necessary to obtain the optimal operating mode of inductor, which will minimize the mentioned losses. The paper is devoted to optimization of static induction heating of steel cylindrical billets before the subsequent plastic deformation operations. The 2D numerical mathematical model of induction heating process, developed in Altair FLUX, is considered as a control object with distributed parameters. The optimal control problems with respect to time-optimal, minimal energy consumption and minimal scale formation criteria are formulated. The solution of formulated problems after their parametrization and reduction to semi-infinite optimization problems can be carried out using alternance method of parametric optimization of objects with distributed parameters. As an example for minimal scale formation problem, the system of transcendental equations closed with respect to all unknowns of the heating process is written based on alternance method. Solving of the system is provided by automatized procedure, which is developed in program package MATLAB. The analysis of numerical results shows that solving this one-criteria optimal control problem allows to reduce the amount of scale with significant increasing of heating time in comparison with time-optimal and minimal energy consumption problems. That is why on the next stages of the investigation it is planned to solve a multi-criteria optimization problem in order to take onto account several typical goal functions simultaneously.

Keywords: induction heating, optimal control, alternance method, minimum scale formation, numerical model, Altair FLUX, MATLAB.



© The Author(s), 2025

¹ Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

Anton V. Popov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

Darya A. Dadabaeva, Student, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

REFERENCES

1. *Vashchenko A.I., Zenkovskij A.G., Lifshic A.E. i dr.* Okislenie i obezuglerozhivanie stali [Oxidation and decarbonization of steel]. M.: Metallurgiya, 1972. 336 p. (In Russian)
2. *Malyj S.A.* Ekonomichnyj nagrev metalla [Economical metal heating]. M.: Metallurgiya, 1967. 191 p. (In Russian)
3. *Rapoport E.Ya.* Alternansnyj metod v prikladnyh zadachah optimizacii [Alternance method in applied optimization problems]. M.: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian)
4. MATLAB Documentation [electronic source]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (data obrashcheniya: 01.04.2025).
5. *Rapoport E.Ya., Pleshivceva Yu.E.* Optimalnoe upravlenie temperaturnymi rezhimami indukcionnogo nagreva [Optimal control of induction heating processes]. M.: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian)
6. *Severdenko V.P., Makushok E.M., Ravvin A.N.* Okalina pri goryachej obrabotke metallov davleniem [Scale during hot metal pressure treatment]. M.: Metallurgiya, 1977. 208 p. (In Russian)
7. *Rapoport E.Ya.* Optimizaciya processov indukcionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. M.: Metallurgiya, 1993. 279 p. (In Russian)
8. *Pleshivceva Yu.E., Popov A.V., Dyakonov A.I.* Dvumernaya zadacha optimal'nogo po ti-povym kriteriyam kachestva upravleniya processom skvoznogo indukcionnogo nagreva [Two-dimensional problem of optimal with respect to typical quality criteria control of through induction heating processes] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2014. No. 2 (42). Pp. 148–163. (In Russian)
9. *Rapoport E.Ya.* Optimalnoe upravlenie sistemami s raspredelennymi parametrami [Optimal control of systems with distributed parameters]. M.: Vysshaya shkola, 2009. 678 p. (In Russian)
10. *Popov A.V.* Optimal'noe proektirovanie i upravlenie rezhimami indukcionnogo nagreva v processe poverhnostnoj zakalki [Optimal design and control of induction heating modes during surface quenching]: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Samara, 2020. 24 p. (In Russian)
11. *Popov A.V., Pleshivceva Yu.E.* Programmnyj kompleks dlya optimizacii processa poverhnostnoj zakalki stal'nyh zagotovok [Software package for optimizing the process of surface hardening of steel billets] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2021. V. 29. No. 2. Pp. 129–144. (In Russian)
12. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences. 2016. Vol. 29. Pp. 02033. DOI: 10.1051/shsconf/20162902033. EDN: WHEUKL
13. Flux [electronic source]. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения: 01.04.2025).
14. *Kovka i shtampovka* [Forging and stamping]: Spravochnik. V 4-h t. V. 1. Materialy i nagrev. Oborudovanie. Kovka. Pod red. *E.I. Semenova*. M.: Mashinostroenie, 1985. 568 p. (In Russian)

Original article submitted 05.05.2025