

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТНЫМ НАГРЕВОМ

© 2016 г. Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов

Самарский государственный технический университет (СамГТУ), г. Самара

Статья поступила в редакцию 08.05.14 г., доработана 02.11.14 г., подписана в печать 16.11.14 г.

Исследован процесс прессования предварительно нагретых заготовок из алюминиевых сплавов на гидравлических прессах технологического комплекса «нагрев – обработка давлением». Стадия нагрева реализуется в многосекционном индукторе, обеспечивающем заданный перепад температуры по длине заготовки. Для создания наиболее благоприятных условий изотермического прессования сформулирована и решена специальная задача параметрической оптимизации процесса прессования на максимум точности приближения температуры в фильере матрицы к ее максимально допустимой согласно технологическим требованиям величине. В качестве управляющего воздействия на стадии прессования рассматривается температурное состояние заготовки после ее загрузки в контейнер пресса. Для решения задачи применяется специальный альтернативный метод оптимизации систем с распределенными параметрами, который реализуется на базе разработанных математических моделей температурных полей заготовки на стадиях нагрева и прессования.

Ключевые слова: производственный комплекс, градиентный индукционный нагрев, изотермическое прессование, параметрическая оптимизация, альтернативный метод, система с распределенными параметрами.

Плешивцева Ю.Э. – докт. техн. наук, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов СамГТУ (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244). E-mail: yulia_pl@mail.ru.

Афиногентов А.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры трубопроводного транспорта СамГТУ. E-mail: pondex@yandex.ru.

Для цитирования: Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А. Оптимизация процесса изотермического прессования слитков из алюминиевых сплавов с предварительным градиентным нагревом // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 49–57. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-49-57.

Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A.

Optimization of isothermal extrusion of aluminum alloy billets with gradient preheating

The study covers extrusion of preheated aluminum-alloy billets at hydraulic presses within the «heating – metal forming» production complex. Billets are preheated in a multi-section induction heater ensuring a predetermined temperature difference along the billet length. To provide the most favorable conditions for isothermal extrusion, a special task of parametric optimization of the forming process was formulated and solved to a maximum accuracy for the die temperature approaching its maximum permissible value specified by process requirements. The billet state as regards its temperature after loading into the press container was considered as a control parameter at the forming stage. The study used a special alternance method designed to optimize distributed parameter systems. This method is based on mathematical models developed for billet temperature fields at the heating and forming stages.

Keywords: production complex, gradient induction heating, isothermal extrusion, parametric optimization, alternance method, distributed parameter system.

Pleshivtseva Yu.E. – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of control and system analysis in heat and power engineering, Samara State Technical University (SamSTU) (Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244). E-mail: yulia_pl@mail.ru.

Afinogentov A.A. – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Pipeline Transport, SamSTU. E-mail: pondex@yandex.ru.

Citation: Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A. Optimizatsiya protsessa izotermicheskogo pressovaniya slitkov iz alyuminievyykh splavov s predvaritel'nyim gradientnym nagrevom. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 49–57. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-49-57.

Введение

Обработка металлов давлением широко представлена в промышленности разнообразными технологиями прессования, прокатки,ковки,штамповки и другими операциями, в которых металл подвергается пластической деформации после предварительного нагрева. Прессование являет-

ся одним из наиболее распространенных и часто незаменимых способов получения металлических полуфабрикатов различной геометрической формы в ведущих отраслях промышленности [1–5].

В различных промышленных технологиях перед обработкой металлов давлением (ОМД) ши-

роко используется индукционный нагрев [6]. Эффективное управление и оптимизация сложных и энергоемких процессов индукционного нагрева металла (ПИНМ) и его последующей пластической деформации неразрывно связаны с развитием ключевых отраслей современной промышленности [7, 8].

Актуальные задачи моделирования и оптимизации взаимосвязанных электромагнитных, температурных и деформационных полей, занимающие одно из центральных мест в современных прикладных научных исследованиях, до недавнего времени решались независимо друг от друга и отдельно для ПИНМ и пластической деформации [6–9].

Основная цель данной работы — показать возможность применения современных методов моделирования и прикладной теории оптимального управления для совместной оптимизации установившихся режимов работы производственного комплекса ОМД на примере широко распространенной технологии прессования на горизонтальных гидравлических прессах предварительно нагретых в индукционных печах заготовок цилиндрической формы для получения изделий из алюминиевых сплавов [7, 8, 10].

Математические модели управляемых процессов

Производственный комплекс «индукционный нагрев—прессование», представляющий совокупность процессов тепловой обработки заготовок на всех стадиях технологического цикла, включая нагрев в индукторе, передачу нагретой заготовки к прессу и процесс прессования (рис. 1), является объектом с распределенными параметрами [7, 10, 11].

Ввиду определяющей роли температурного фактора изменяющееся во времени температурное распределение по объему заготовки можно рас-

сматривать как управляемую функцию состояния объекта, для моделирования которой был разработан ряд проблемно-ориентированных на использование в оптимизационных процедурах численно-аналитических моделей различного уровня сложности.

Температурное распределение $T_1(r, l, t)$ по объему цилиндрической заготовки радиусом R и длиной L , изменяющееся во времени $t \in [0, t_1^0]$ по радиальной r и продольной l координатам в ПИНМ длительностью t_1^0 , может быть описано взаимосвязанной нелинейной системой уравнений Максвелла и Фурье с соответствующими краевыми условиями [10–13]. На стадии транспортирования к прессу длительностью Δ_T температурное поле заготовки $T_2(r, l, t)$, $t \in [t_1^0, t_1^0 + \Delta_T]$ описывается уравнением Фурье при отсутствии источников тепла с граничными условиями, учитывающими существенные тепловые потери в окружающую среду.

Для моделирования стадий нагрева и транспортирования разработаны двумерные нелинейные численно-аналитические электротепловые модели. Анализ взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в ПИНМ реализован на базе универсального программного пакета ANSYS [14–16].

Расчет температурного поля $T_3(r, l, t)$ в процессе прессования при $t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]$ представляет собой нетривиальную задачу. Основные трудности связаны с необходимостью решения задачи механики сплошных сред для оценки поля скоростей потока металла и пространственного распределения источников тепла, определяемых энергией пластического формоизменения деформируемого металла в процессе прессования. В работах [7, 8, 13] предложен упрощенный подход, основанный на известной гипотезе сферических сечений, согласно которой в пределах обжимающей части пластической зоны (ОЧПЗ), границы которой определяются радиусом слитка R , радиусом пресс-изделия R_k и углом $\alpha > 0$, учитывающим существование упругой зоны при прессовании, скорости течения металла V_c постоянны на концентрических сферах радиусом R_c с центром в т. O_1 и направлены к этой точке (рис. 2).

Это позволяет в условиях осесимметричной деформации при постоянной скорости прессования V_p получить достаточно простые аналитические зависимости для описания радиальной и



Рис. 1. Стадии обработки заготовки в производственном комплексе «индукционный нагрев – прессование»

осевой составляющих $V_r(r, l, V_p)$, $V_l(r, l, V_p)$ вектора скорости течения прессуемого металла. В пределах упругой зоны с неподвижной массой металла выполняется условие $V_r = V_l \equiv 0$, а за ее пределами и вне ОЧПЗ можно принять $V_l \equiv V_p$, $V_r = 0$ слева от ОЧПЗ и $V_l = V_p/(R_k/R)^2$, $V_r = 0$ справа от нее, пренебрегая радиальной составляющей скорости течения.

Процесс прессования сопровождается непрерывным перемещением заготовки относительно матрицы пресса, что можно интерпретировать как непрерывное перемещение концентрических сфер, ограничивающих области деформации (рис. 3) [17].

Используя известные зависимости для интенсивности скоростей деформации сдвига H от компонент тензора скоростей деформации в цилиндрической системе координат, а также линейные аппроксимации зависимости интенсивности касательных напряжений от температуры, может быть получена функция $W^*(r, l, V_r, V_l, V_p)$ пространственного распределения внутренних источников тепла, обусловленных энергией пластического формоизменения металла [7, 8, 13]. Тогда температурное поле $T_3(r, l, t)$ в процессе прессования $t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]$ описывается двумерным нестационарным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T_3(r, l, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T_3(r, l, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_3(r, l, t)}{\partial l^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, l, t)}{\partial r} \right] - V_r(r, l, V_p) \frac{\partial T_3(r, l, t)}{\partial r} - V_l(r, l, V_p) \frac{\partial T_3(r, l, t)}{\partial l} + \frac{W^*(r, l, V_r, V_l, V_p)}{c\gamma}, \quad (1)$$

где a — усредненное значение коэффициента теплопроводности материала заготовки; c и γ — коэффициент теплоемкости и плотность.

Решение уравнения (1), дополненного следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_3(r, l, t)}{\partial r} &= Bi [T_c^0 - T_3(R, l, t)] + q(l, V_p), \\ \frac{\partial T_3(0, l, t)}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial T_3(r, L, t)}{\partial l} &= Bi_1 [T_{cl}^0 - T_3(r, L, t)], \\ -\frac{\partial T_3(r, 0, t)}{\partial l} &= Bi_0 [T_{c0}^0 - T_3(r, 0, t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где Bi , Bi_0 , Bi_1 и T_c^0 , T_{cl}^0 , T_{c0}^0 — соответственно значения критерия Био и эквивалентной температуры

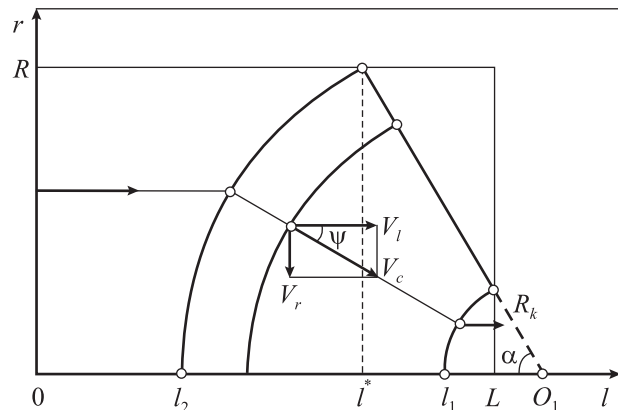


Рис. 2. Схема определения поля скоростей течения прессуемого металла

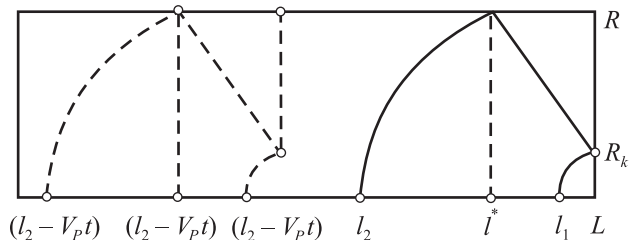


Рис. 3. Изменение положения областей деформации в процессе прессования металла

окружающей среды для оценки тепловых потерь с поверхности заготовки, $q(l, VP)$ — тепловой поток контактного трения при прямом прессовании, а также дополненного соответствующими начальными условиями, замыкает процедуру численно-аналитического моделирования процесса прессования.

Численная модель температурного поля заготовки в ходе прессования может быть реализована средствами специализированного пакета программ LS-DYNA на базе метода конечных элементов [17], который интегрирован в систему ANSYS, что позволяет использовать последнюю в качестве пре- и постпроцессора, а также осуществлять интеграцию с задачей моделирования температурного поля заготовки в ПИНМ. Некоторые результаты моделирования процесса прессования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 4 и 5.

Описанные численно-аналитические модели в совокупности представляют математическую модель технологического комплекса «нагрев — прессование», существенной особенностью которого является последовательная смена во времени периодов функционирования его отдельных этапов. Основные взаимосвязи между стадиями нагрева,

транспортирования и прессования определяются следующими начальными условиями:

$$\begin{aligned} T_1(r, l, t_1^0) &= T_2(r, l, t_1^0), \\ T_3(r, l, t_1^0 + \Delta_T) &= T_2(r, l, t_1^0 + \Delta_T), \end{aligned} \quad (3)$$

согласно которым температурное состояние объекта в начале последующей стадии совпадает с его температурным состоянием в конце предыдущей стадии на границах $t = t_1^0$ и $t = t_1^0 + \Delta_T$ перехода от одной стадии технологического цикла к другой.

При этом время транспортирования Δ_T считается известным и фиксированным. Вопрос выбора

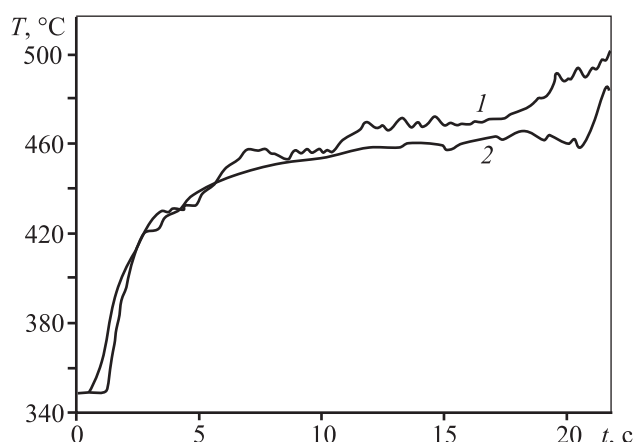


Рис. 4. Изменение выходной температуры при прессовании со скоростью 1 мм/с прутка из сплава Д16 диаметром 20 мм из контейнера диаметром 150 мм [17]
1 – модель LS-Дуна; 2 – экспериментальные данные

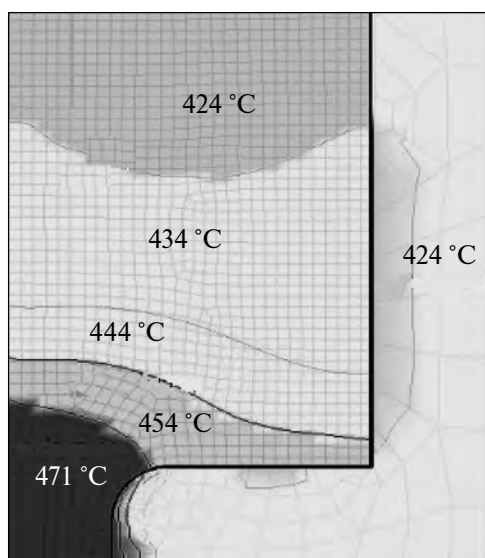


Рис. 5. Изотермы температурного поля при прессовании прутка из алюминиевого сплава Д16 (модель LS-Дуна [17])

его оптимальной величины представляет самостоятельную задачу, рассмотренную в работах [7, 18].

Разработанные численно-аналитические модели взаимосвязанных электромагнитных, температурных и деформационных полей использовались как отдельно, так и совместно на различных этапах проведенных исследований в зависимости от их целей. На этапе качественного анализа проблем моделирования и оптимизации применялись упрощенные численно-аналитические модели, которые предоставляют максимальные возможности для изучения общих закономерностей и нахождения приближенных количественных оценок оптимальных процессов. При этом требуемая точность описания температурных состояний на последующих этапах решения задач оптимизации обеспечивалась при моделировании распределений температуры по объему цилиндрической заготовки с помощью значительно более сложных и ресурсоемких двумерных численных моделей.

Постановка задачи оптимизации стадии прессования

Рассмотрим задачу оптимизации процесса прессования для наиболее типичного случая, когда скорость прессования неизменна на протяжении всего процесса: $V_p = \text{const}$. В этих условиях максимально возможная производительность технологического комплекса «индукционный нагреватель — пресс» определяется силовыми возможностями деформирующего оборудования, прочностью инструмента, температурным интервалом пластичности прессуемого металла и другими факторами, позволяющими осуществить прессование лишь в определенной области Ω начальных температурных состояний:

$$T_3(r, l, t_1^0 + \Delta_T) \in \Omega. \quad (4)$$

Поведение температурного поля $T_3(r, l, t)$ в процессе прессования ограничивается заданным допустимым пределом максимальной температуры пластической зоны ($T_{3кр}$), которая достигается в фильтре матрицы $T_3(r_\phi, l_\phi, t)$, т.е. в точке с координатами $(r = r_\phi, l = l_\phi)$:

$$T_{3\phi}(t) = \max_{t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]} T_3(r_\phi, l_\phi, t) \leq T_{3кр}. \quad (5)$$

Поскольку наиболее благоприятный режим прессования реализуется при условии $T_3(r_\phi, l_\phi, t) = T_{3кр}$, задача оптимизации может быть сформу-

лирована как задача максимального приближения к режиму изотермического прессования, который имеет место, когда температура в фильере матрицы поддерживается на максимально допустимом уровне $T_{3кр}$ [7, 8, 14]. Величина $T_{3кр}$ задается технологическими требованиями и обеспечивает необходимое качество структуры материала пресс-изделий и энергетических характеристик прессового оборудования.

Для обеспечения наибольшей точности поддержания температуры в фильере матрицы $T_3(r_\phi, l_\phi, t)$ на уровне $T_{3кр}$ рассмотрим в качестве критерия оптимизации абсолютную точность приближения $T_3(r_\phi, l_\phi, t)$ в каждый момент процесса прессования $t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]$ к требуемой температуре $T_{3кр}$. Поскольку при $V_p = \text{const}$ основным фактором, влияющим на рост температуры в фильере матрицы, является начальное температурное распределение перед процессом прессования $T_3(r, l, t_1^0 + \Delta_T)$, его можно рассматривать как искомое управляющее воздействие, стесненное ограничением (4), что позволяет записать критерий оптимальности в виде

$$I = \max_{t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]} |T_3(r_\phi, l_\phi, t) - T_{3кр}| \rightarrow \min_{T_3(r, l, t_1^0 + \Delta_T) \in \Omega} \quad (6)$$

Решение задачи оптимизации стадии прессования

В пренебрежении радиальной неравномерностью начального температурного состояния используем $\Lambda^{(S)}$ -параметризованное представление управляющего воздействия в форме кусочно-линейной функции, описывающей требуемый характер распределения температуры по длине слитка при его градиентном нагреве, который обеспечивает достаточно малую величину критерия (6) [14, 15]:

$$T_3(r, l, t_1^0 + \Delta_T) = T_3^0(l, \Lambda^{(S)}, t_1^0 + \Delta_T) = \begin{cases} T_{02} + \frac{(T_{01} - T_{02})l}{l_{01}}, & 0 < l \leq l_{01}, \\ T_{02} + \frac{(T_{00} - T_{01})(l - l_{01})}{L - l_{01}}, & l_{01} < l \leq L, \end{cases} \quad (7)$$

где $\Lambda^{(S)} = (\Delta_i)$, $i = \overline{1, S}$, $2 \leq S \leq 4$: $\Delta_1 = T_{00}$; $\Delta_2 = T_{01}$; $\Delta_3 = T_{02}$; $\Delta_4 = l_{01}$.

Таким образом, вектор оптимизируемых параметров $\Lambda^{(S)}$ включает значения температур T_{00} , T_{02} на концах заготовки и температуру T_{01} в точке с координатой l_{01} . В зависимости от числа S искомых параметров вектора $\Lambda^{(S)}$ рассматриваются двух-,

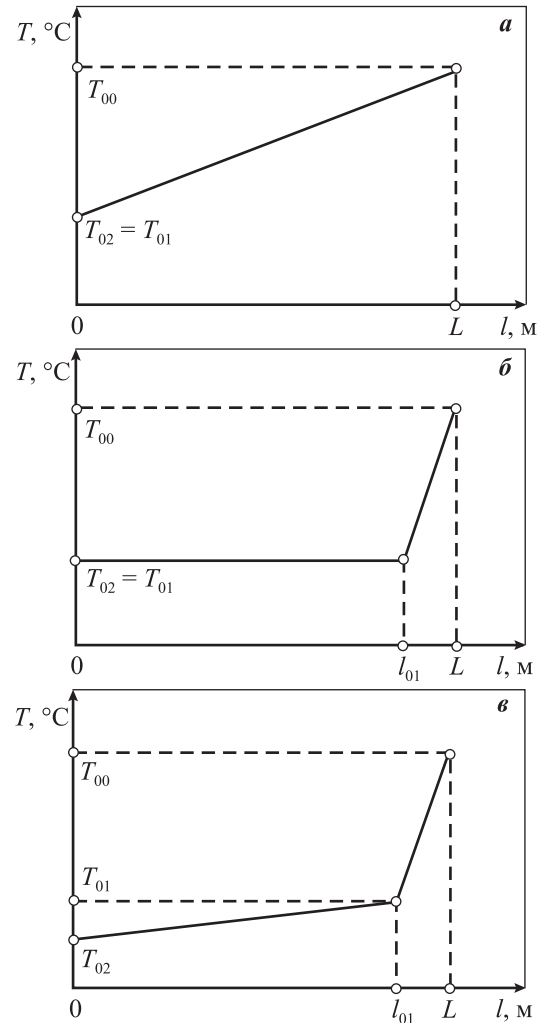


Рис. 6. Различные варианты параметризованного представления температурных профилей заготовки перед прессованием

- a** – $S = 2$, $T_{02} = T_{01}$, $l_{01} = L$
- б** – $S = 2$ при $T_{01} = T_{02}$, $l_{01} = \text{const}$ или $S = 3$ при $T_{01} = T_{02}$, $l_{01} \leq L$
- в** – $S = 3$ при $l_{01} = \text{const}$ или $S = 4$ при $l_{01} \leq L$

трех- и четырехпараметрические задачи оптимизации с соответствующими векторами оптимизируемых параметров температурных профилей перед прессованием (рис. 6).

В результате без каких-либо погрешностей, в рамках используемых моделей, осуществляется точная редукция исходной задачи на минимум функционала (6) к задаче математического программирования на поиск экстремума критерия оптимальности следующего вида:

$$I(\Lambda^{(S)}) = \max_{t \in [t_1^0 + \Delta_T, t_2^0]} |T_3(r_\phi, l_\phi, t, \Lambda^{(S)}) - T_{3кр}| \rightarrow \min_{\Lambda^{(S)}} \quad (8)$$

которая представляет собой задачу поддержания изотермического режима прессования за счет начально-

го положительного перепада температуры по длине слитка в направлении прессования, достижимого с применением технологии градиентного нагрева на предварительной стадии термообработки.

Градиентный нагрев заготовок можно реализовать в многосекционной индукционной нагревательной установке (ИНУ) периодического действия (рис. 7) с управляющими воздействиями по мощности тепловыделения на различных участках по длине слитка [14, 15], каждое из которых в общем случае реализуется в форме соответствующей оптимальной программы его изменения во времени.

Задача (8) может быть решена на основе установленных альтернативных свойств зависимости температуры в фильере матрицы от времени в оптимальном процессе прессования с постоянной скоростью [14, 15]. Согласно этим свойствам число K_τ точек максимальных отклонений ε температуры в фильере матрицы $T_3(r_\phi, l_\phi, t)$ от $T_{3кр}$ в моменты времени $\tau_j^0, j = 1, K_\tau$ оптимального процесса прессования должно быть не меньше числа S искомых параметров вектора $\Delta^{(S)}$, а в случае, когда выполняется условие [19, 20]

$$I(\Delta^{(S)}) = \varepsilon_{\min}^{(S)}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_{\min}^{(S)}$ — минимально возможное отклонение, достижимое в классе $\Delta^{(S)}$ -параметризованных управляющих воздействий, имеет место строгое равенство

$$K_\tau = S + 1. \quad (10)$$

При этом максимально допустимые отклонения $T_3(r_\phi, l_\phi, t) - T_{3кр}$ являются знакоперевающими, т.е. достигаются последовательно в моменты времени $\tau_j^0, j = 1, K_\tau, t_1^0 + \Delta_T \leq \tau_1^0 < \tau_2^0 < \dots < \tau_{K_\tau}^0 \leq t_1^0 + \Delta_T + t_2^0$ с противоположными знаками, а ми-

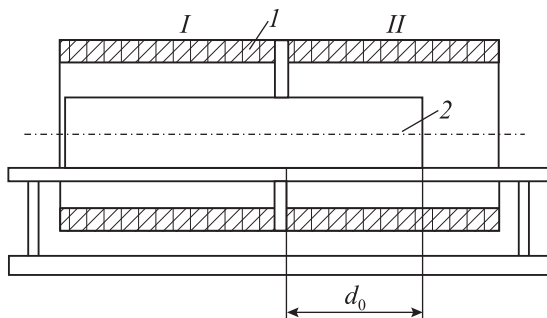


Рис. 7. Двухсекционная индукционная нагревательная установка

I — секция индуктора, 2 — металлическая заготовка
 d_0 — величина заглабления заготовки в секцию II

нимально достижимые в классе S -параметризованных управлений значения $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(S)}$ монотонно убывают с возрастанием $S \in \{1, \eta\}$ и образуют последовательность неравенств вида [7, 19, 20]

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(S)} > \varepsilon_{\min}^{(S+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(\eta)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0. \quad (11)$$

Данные факты позволяют записать систему уравнений для поиска вектора $\Delta_{\text{opt}}^{(S)} = (\Delta_1^0, \Delta_3^0, \dots, \Delta_S^0)$ оптимальных параметров температурного распределения $T_3^0(l, \Delta^{(S)}, t_1^0 + \Delta_T)$ перед процессом прессования следующим образом:

$$\begin{cases} T_3(r_\phi, l_\phi, \tau_j^0, \Delta_{\text{opt}}^{(S)}) - T_{3кр} = (-1)^j \psi \varepsilon, j = 1, 2, \dots, K_\tau, \\ \frac{\partial (T_{3\phi}(r_\phi, l_\phi, \tau_j^0, \Delta_{\text{opt}}^{(S)}) - T_{3кр})}{\partial t} = 0, \\ t_1^0 + \Delta_T \leq \tau_1^0 < \tau_2^0 < \dots < \tau_{K_\tau}^0 \leq t_1^0 + \Delta_T + t_2^0, \\ K_\tau = \begin{cases} S, & \text{если } \varepsilon_{\min}^{(S)} < \varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}, \\ S + 1, & \text{если } \varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(S)}. \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

Здесь коэффициент $\psi = \pm 1$ учитывает два возможных варианта по знаку отклонений в каждый момент времени $\tau_j^0, j = 1, K_\tau$.

Некоторые результаты расчета оптимальных процессов прессования алюминиевых заготовок получены для следующих исходных данных: $V_p = 450$ мм/мин, диаметр заготовки — 250 мм, длина заготовки — 430 мм, $T_{3кр}^* = 400$ °С. Зависимости $T_{3\phi}(r_\phi, l_\phi, \tau_j^0, \Delta^{(S)})$ в системе уравнений (12) рассчитывались с помощью описанных выше взаимосвязанных численно-аналитических моделей многостадийного процесса ОМД.

На рис. 8 представлены оптимальные параметры кусочно-линейных аппроксимаций температурных профилей по длине заготовки перед процессами изотермического прессования для $S = 2, 4$ и временные зависимости $T_3(r_\phi, l_\phi, t)$ в соответствующих оптимальных процессах прессования. Анализ полученных результатов показывает, что в каждый момент процесса прессования максимальное отклонение температуры в фильере матрицы от предельного уровня $T_{3кр}^*$ не превышает 20 °С при $S = 2$ и убывает до 2,2 °С при $S = 4$, что удовлетворяет даже достаточно жестким технологическим требованиям.

Заключение

В работе изложены подходы к построению проблемно-ориентированных математических мо-

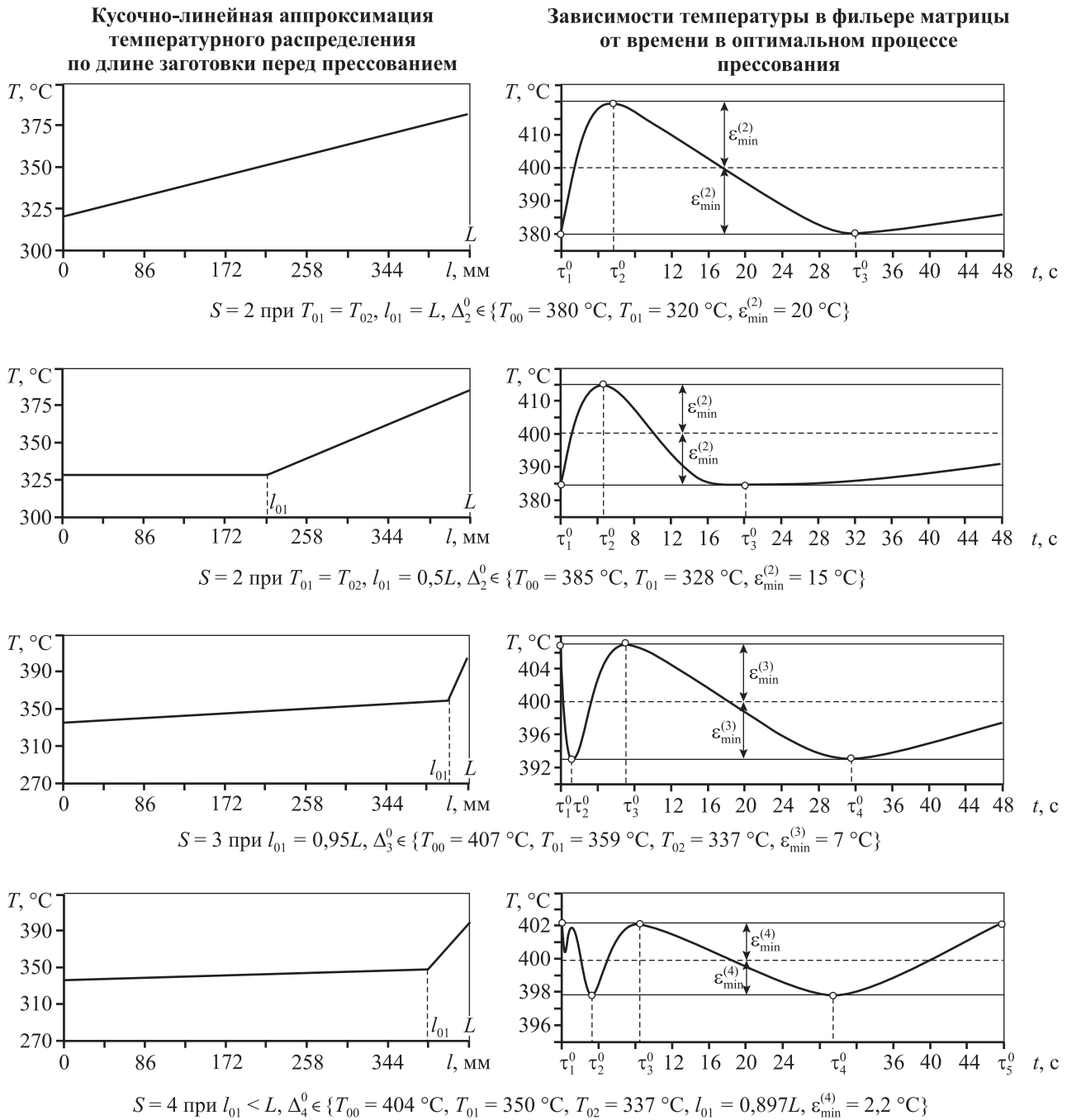


Рис. 8. Результаты оптимизации процессов прессования

делей взаимосвязанных электромагнитных, температурных и деформационных полей в технологическом комплексе «индукционный нагрев — прессование».

На базе разработанных численно-аналитических моделей различного уровня сложности решена задача оптимизации процесса изотермического прессования с постоянной скоростью алюминиевых заготовок цилиндрической формы, в

которой в качестве управляющего воздействия рассматривается параметризованное температурное распределение по объему заготовки перед процессом прессования. Полученные результаты показывают, что начальный положительный перепад температур по длине заготовки в направлении прессования, который можно обеспечить в условиях градиентного нагрева, позволяет во всех рассмотренных случаях обеспечить максимальное

приближение к наиболее благоприятному режиму изотермического прессования, имеющему место в случае поддержания температура в фильере матрицы на максимально допустимом уровне.

Работа финансирована Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, проект № 1436).

Литература

1. *Ping Hu, Ning Ma, Li-zhong Liu, Yi-guo Zhu.* Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering. London: Springer, 2012.
2. *Nusheh M., Ahuett H.G., Arrambide A.* (Eds.) Recent Researches in Metallurgical Engineering: From Extraction to Forming. Rijeka: InTech, 2012.
3. *McQueen H.J., Spigarelli S., Kassner M.E., Evangelista E.* Hot deformation and Processing of Aluminum Alloys. Boca Raton: CRC Press, 2011.
4. *Totten G., MacKenzie D.* Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. New York: Marcel Dekker Ltd., 2003.
5. *Гун Г.* Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980.
6. *Rudnev V.I., Loveless D., Cook R., Black M.* Handbook of induction heating. Boca Raton: CRC Press, 2003.
7. *Rapoport E., Pleshivtseva Yu.* Optimal Control of Induction Heating Processes. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group., 2007.
8. *Panonopt Э.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993.
9. *Totten G.E., Lin X., Funatani K.* Modeling and Simulation for Material Selection and Mechanical Design. Boca Raton: CRC Press, 2003.
10. *Rapoport E., Pleshivtseva Y.* Optimal control of induction heating of metals prior to warm and hot forming // ASM Handbook series. Vol. 4C.: Induction Heating and Heat Treatment. Materials Park, ASM International, 2014. P. 915—991.
11. *Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Afinogentov A., Shemyakin Yu., Nacke B., Nikanorov A.* Application of optimal control theory for optimization of metal hot forming lines with induction pre-heating // Proc. Int. Symp. Heating by Electromagnetic Sources (HES-10). Padua, Italy, 2010. P. 557—564.
12. *Panonopt Э.Я.* Оптимизация режимов нагрева и прессования металла в технологическом комплексе «печь—пресс» // Физика и химия обработки материалов. 1985. No. 3. С. 66—73.
13. *Panonopt Э.Я.* Математическое моделирование температурных полей деформируемого металла в про-

цессе прессования // Физика и химия обработки материалов. 1980. No. 1. С. 29—39.

14. *Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А.* Оптимальное управление энерготехнологическими процессами в производственных комплексах // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. No. 3. С. 51—55.
15. *Афиногентов А.А.* Моделирование процесса деформации металлических заготовок цилиндрической формы // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.- мат. науки. 2007. No. 2(15). С. 170—172.
16. *Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Коршиков С.Е.* Параметрическая оптимизация температурного профиля нагреваемой заготовки перед прессованием // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2010. No. 2(26). С. 196—203.
17. *Шемякин Ю.В.* Разработка численной модели процесса прессования цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава с целью использования в оптимизационных процедурах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. No. 10. С. 62—65.
18. *Pleshivtseva Yu.* Transportation” problem of time-optimal heating // Int. J. Materials and Product Technology. 2007. Vol. 29. No. 1/4. P. 137—148.
19. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Nonlinear Objects of Engineering Thermophysics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. Vol. 48. No. 5. P. 429—437; Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление нелинейными объектами технологической теплофизики // Автометрия. 2012. Т. 48. No. 5. С. 3—13.
20. *Rapoport E.Y.* Minimax optimization of stationary states in systems with distributed parameters // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 165—179; *Panonopt Э.Я.* Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2013. No. 2. С. 3—18.

References

1. *Ping Hu, Ning Ma, Li-zhong Liu, Yi-guo Zhu.* Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming. Analysis, Simulation and Engineering. London: Springer, 2013.
2. *Nusheh M., Ahuett H.G., Arrambide A.* (Eds.) Recent Researches in Metallurgical Engineering: From Extraction to Forming. Rijeka: InTech, 2012.
3. *McQueen H.J., Spigarelli S., Kassner M.E., Evangelista E.* Hot deformation and Processing of Aluminum Alloys. Boca Raton: CRC Press, 2011.

4. *Totten G., MacKenzie D.* Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. New York: Marcel Dekker Ltd., 2003.
5. *Gun G.* Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem [Theoretical basis of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1980.
6. *Rudnev V.I., Loveless D., Cook R., Black M.* Handbook of induction heating. Boca Raton: CRC Press, 2003.
7. *Rapoport E., Pleshivtseva Yu.* Optimal Control of Induction Heating Processes. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group., 2007.
8. *Rapoport E.* Optimizatsiya protsessov induktsionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating of metal]. Moscow: Metallurgiya, 1993.
9. *Totten G.E., Lin X., Funatani K.* Modeling and Simulation for Material Selection and Mechanical Design. Boca Raton: CRC Press, 2003.
10. *Rapoport E., Pleshivtseva Y.* Optimal control of induction heating of metals prior to warm and hot forming. In: *ASM Handbook series. Vol. 4C: Induction Heating and Heat Treatment.* Materials Park, ASM International, 2014. P. 915–991.
11. *Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Afinogentov A., Shemyakin Yu., Nacke B., Nikanorov A.* Application of optimal control theory for optimization of metal hot forming lines with induction pre-heating. *Proc. Int. Symp. Heating by Electromagnetic Sources (HES-10).* Padua, Italy, 2010. P. 557–564.
12. *Rapoport E.Ya.* Optimizatsiya rezhimov nagreva i pressovaniya metalla v tekhnologicheskom komplekse «pech'-press» [Optimisation of metal pre-heating and hot forming modes in «oven-press» production complex]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov.* 1985. No. 3. P. 66–73.
13. *Rapoport E.Ya.* Matematicheskoe modelirovanie temperaturnykh polei deformiruемого metalla v protsesse pressovaniya [Mathematical modeling of deformable metal temperature fields in the forming process]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov.* 1980. No. 1. P. 29–39.
14. *Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A.* Optimal'noe upravlenie energotekhnologicheskimi protsessami v proizvodstvennykh kompleksakh [Optimal control of energy-technological processes in production complexes]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika.* 2008. No. 3. P. 51–55.
15. *Afinogentov A.A.* Modelirovanie protsessa deformatsii metallicheskih zagotovok tsilindricheskoi formy [Simulation of cylindrical billets hot forming process]. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.- mat. nauki.* 2007. No. 2(15). P.170–172.
16. *Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Korshikov S.E.* Parametricheskaya optimizatsiya temperaturnogo profilya nagrevaemoi zagotovki pered pressovaniem [Parametric optimization of temperature distribution within heated billet before pressing process]. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki.* 2010. No. 2(26). P.196–203.
17. *Shemyakin Yu.V.* Razrabotka chislennoi modeli protsessa pressovaniya tsilindricheskikh zagotovok iz alyuminievo-go splava s tsel'yu ispol'zovaniya v optimizatsionnykh protsedurakh [Development of a numerical model of the aluminum alloy cylindrical billets forming process to be used in optimization procedures]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk.* 2013. No. 10. P. 62–65.
18. *Pleshivtseva Yu.* Transportation" problem of time-optimal heating. *Int. J. Materials and Product Technology.* 2007. Vol.29. No.1/4. P. 137–148.
19. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal Control of Nonlinear Objects of Engineering Thermophysics. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2012. Vol. 48. No. 5. P. 429–437.
20. *Rapoport E.Y.* Minimax optimization of stationary states in systems with distributed parameters. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013. Vol. 52. No. 2. P. 165–179.