

УДК 681.5

ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА «НАГРЕВ – ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ»*

А.А. Афиногентов, М.Ю. Деревянов

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

Рассмотрены стратегии выпуска продукции на производственном комплексе «нагрев – обработка металлов давлением», включающем индукционную нагревательную установку и гидравлический пресс. В качестве основного показателя эффективности функционирования производственного комплекса рассматривается себестоимость выпускаемой продукции. При фиксированных постоянных затратах проанализирована зависимость расхода энергии на выпуск единицы продукции от скорости прессования и температуры нагрева заготовок. Установлено, что стратегии максимальной производительности и минимального энергопотребления являются конкурирующими. На основе анализируемых стратегий формулируются и решаются задачи оптимального управления производственным комплексом.

Ключевые слова: индукционная нагревательная установка, обработка металла давлением, энергоэффективность, производительность.

Основной целью работы является исследование эффективности стратегий функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» на примере широко распространенной технологии прессования на горизонтальных гидравлических прессах предварительно нагретых в индукционных печах заготовок цилиндрической формы для получения изделий из алюминиевых сплавов [1, 2].

Производственный комплекс «нагрев – обработка металла давлением» состоит из трех последовательных стадий технологического цикла тепловой обработки заготовок: нагрев в индукционной нагревательной установке, передача нагретой заготовки к прессу и процесс прессования (рис. 1).

В процессе функционирования комплекса для придания требуемых пластичных свойств металлу используется стадия предварительного нагрева обрабатываемой заготовки в индукционной печи, а для получения прочностных характеристик и требуемого профиля заготовки осуществляется прессование. Технология прессования в рассматриваемом производственном комплексе включает операцию выдавливания алюминия из замкнутой полости через фильеру матрицы, соответствующей сечению прессуемого профиля. Каждая стадия обработки металла характеризуется изменением прочностных свойств и температурных условий, которые тесно взаимосвязаны.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-08-00926 и №14-08-01255.

Александр Александрович Афиногентов (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Максим Юрьевич Деревянов (к.т.н.), доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».



Рис. 1. Стадии обработки заготовки в производственном комплексе «нагрев – обработка металла давлением»

Актуальные задачи прикладных научных исследований в области моделирования и оптимизации взаимосвязанных электромагнитных, температурных и деформационных полей до недавнего времени решались независимо друг от друга и отдельно для процессов индукционного нагрева металлов (ПИНМ) и пластической деформации [1, 2]. В настоящее время разработан ряд математических проблемно-ориентированных на использование в оптимизационных процедурах численно-аналитических моделей различного уровня сложности, описывающих изменяющееся во времени температурное распределение по объему заготовки в процессе нагрева и прессования, которое ввиду определяющей роли температурного фактора можно рассматривать как управляемую функцию состояния объекта [3, 4].

Под эффективностью функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением» понимается соответствие технико-экономического показателя работы всех его компонентов требованиям, предъявляемым к производительности и (или) энергоэффективности. Себестоимость выпускаемой продукции I определяется суммой s статей расходов P_i , $i = \overline{1, s}$ на изготовление продукции комплекса и будет рассматриваться в качестве основного показателя эффективности:

$$I = \sum_{i=1}^s C_i \cdot P_i + C_t \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_i – стоимостные коэффициенты статей расходов, определяемые тарифами на энергетические ресурсы и стоимостью сырья;

C_t – условно-постоянные затраты, к которым относятся коммунальные и арендные платежи, заработная плата обслуживающего персонала и т. п.

Анализ основных статей затрат P_i в (1) показал, что основную долю в себестоимости продукции занимают энергетические затраты на нагрев и прессование [1–4].

Энергетические затраты комплекса определяются величиной потребления электрической энергии. Трансформации электрической энергии в полезную работу зависит от КПД нагревательной установки и деформирующего оборудования.

КПД индукционной установки η_{II} равен произведению электрического $\eta_{ЭИ}$ и термического η_t КПД [4]:

$$\eta_{II} = \eta_{ЭИ} \cdot \eta_t = \frac{P_2}{P_{ЭИ}} \cdot \frac{P_H}{P_2} = \frac{P_H}{P_{ЭИ}}, \quad (2)$$

где $P_2 = P_H + \Delta P$ – полная мощность, определяемая полезной мощностью нагрева P_H и тепловыми потерями через изолирующий цилиндр ΔP , $P_{ЭИ}$ – электрическая мощность, подведенная к индуктору.

Полезную мощность P_H , необходимую для нагрева заготовки, можно определить по формуле [4]

$$P_H = \frac{c \cdot M \cdot \Delta T_H}{\tau_H}, \quad (3)$$

где c – теплоемкость нагреваемого металла;

τ_H – длительность нагрева;

M – масса заготовки;

ΔT_H – величина нагрева, усредненная по объему заготовки.

Тогда с учетом (2) и (3) удельный расход электроэнергии, необходимой для нагрева единицы массы металла, определяется выражением [4]

$$E_{ЭН}^{(y\theta)} = \frac{c \cdot \Delta T_H}{\eta_{II}}. \quad (4)$$

Полный КПД прессы η_{II} определяется произведением КПД насосной установки $\eta_{НУ}$, гидросистемы $\eta_{ГС}$ и механического КПД гидроцилиндра η_M [4]:

$$\eta_{II} = \eta_{НУ} \cdot \eta_{ГС} \cdot \eta_M = \frac{E_M}{E_{ЭП}} \cdot \frac{E_i}{E_M} \cdot \frac{A_D}{E_i} = \frac{A_D}{E_{ЭП}}, \quad (5)$$

где E_M – энергия потока жидкости;

E_i – индикаторная энергия гидроцилиндра;

A_D – полезная работа деформации;

$E_{ЭП}$ – величина затраченной электрической энергии в процессе прессования.

Величина работы деформации A_D определяется произведением силы F_D , приложенной к заготовке, на путь пуансона h :

$$A_D = F_D \cdot h = \sigma_{np} \cdot S \cdot h = \sigma_{np} \cdot V, \quad (6)$$

здесь σ_{np} – величина давления на пресс-шайбе;

$V = S \cdot h$ – объем металлической заготовки.

Величина среднего прироста температуры в пластической зоне ΔT_{II} за счет теплового эффекта деформации пропорциональна величине давления на пресс-шайбе:

$$\Delta T_{II} = z \cdot \sigma_{np}, \quad (7)$$

где z – коэффициент, определяемый теплофизическими характеристиками прессуемых материалов [5].

В результате определяется зависимость, связывающая величину прироста температуры пластической зоны ΔT_{II} с объемом потребления электрической энергии в процессе прессования:

$$A_{\text{д}} = \frac{\Delta T_{\text{п}}}{z} \cdot V = \eta_{\text{п}} \cdot E_{\text{элп}}; \quad (8)$$

$$E_{\text{элп}} = \frac{\Delta T_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}} \cdot z} \cdot V, \quad (9)$$

откуда удельный расход электрической энергии $E_{\text{элп}}^{(y\delta)}$, отнесенный к единице массы металла, можно определить как

$$E_{\text{элп}}^{(y\delta)} = \frac{\Delta T_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}} \cdot \rho \cdot z}, \quad (10)$$

где ρ – плотность металла.

Скорость прессования $V_{\text{п}}$ оказывает значительное влияние на прирост температуры пластической зоны $\Delta T_{\text{п}}$ в процессе прессования. С ростом скорости прессования происходит увеличение теплового потока контактного трения и повышение интенсивности внутренних источников тепла, определяемых энергией пластического формоизменения [3, 5].

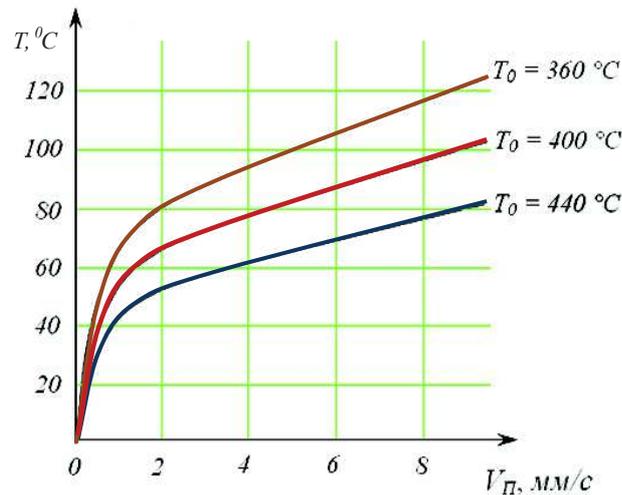


Рис. 2. Зависимость скорости прессования от максимального прироста температуры пластической зоны при различных температурах нагрева T_0

На рис. 2 приведен график изменения скорости прессования от максимального прироста температуры пластической зоны при различных температурах нагрева T_0 . При этом скорость прессования изменялась в диапазоне от 0 до 11 мм/с, а температурное распределение перед прессованием по длине и радиусу заготовки принималось равномерным.

При анализе работы производственного комплекса, которая базируется на жестких технологических инструкциях, прежде всего необходимо учитывать ограничения на максимально допустимую температуру в процессе прессования $T_{\text{пmax}}^*$.

На рис. 3 показаны зависимости удельного расхода электрической энергии при предварительном нагреве в индукционной печи $E_{\text{элн}}^{(y\delta)}$, прессовании $E_{\text{элп}}^{(y\delta)}$ и

суммарном потреблении электрической энергии $E_{\Sigma}^{(y\partial)}$ от скорости прессования V_{II} (а) и максимальной температуры нагрева T_H^* (б) при $\eta_{II} = 0.85$, $\eta_{II} = 0.65$, $z = 3.1 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Па}$, $\rho = 2800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c = 980 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$, $T_{II\text{max}}^* = 490 \text{ } ^\circ\text{C}$.

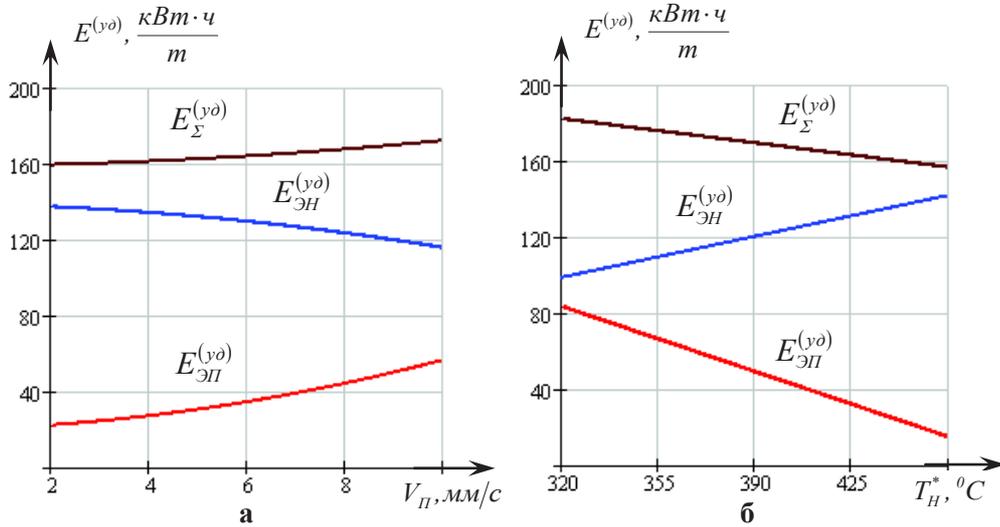


Рис. 3. Зависимости удельного расхода электрической энергии при предварительном нагреве в индукционной печи $E_{\text{ЭН}}^{(y\partial)}$, прессовании $E_{\text{ЭП}}^{(y\partial)}$ и суммарном потреблении электрической энергии $E_{\Sigma}^{(y\partial)}$ от скорости прессования V_{II} (а) и максимальной температуры нагрева T_H^* (б)

Выводы

Анализ зависимостей (см. рис. 3) показал, что увеличение производительности комплекса «нагрев – обработка металла давлением» приводит одновременно к увеличению расхода электрической энергии на пресс и уменьшению на нагрев в индукционной печи. Это объясняется тем, что прирост температуры пластической зоны увеличивается при больших скоростях прессования, а это, в свою очередь, приводит к понижению температуры нагрева заготовки в индукторе и росту требуемого усилия прессования. Кроме того, установлено, что электрический КПД индукционной установки выше аналогичного КПД пресса, поэтому повышение производительности комплекса приводит к росту суммарного удельного расхода электрической энергии. Таким образом, стратегии минимального энергопотребления и максимальной производительности являются конкурирующими, а выбор весовых коэффициентов критерия (1) должен осуществляться исходя из текущих требований по выпуску продукции.

На основе выбранной стратегии функционирования комплекса «нагрев – обработка металла давлением» при соответствующей фиксации отдельных весовых коэффициентов критерия (1) могут быть сформулированы соответствующие задачи оптимизации режимов работы комплекса.

В частности, в [6, 7] сформулирована и решена задача совместной оптимизации температурных режимов индукционного нагрева и обработки металла дав-

лением по критерию максимального приближения к режиму изотермического прессования с управляющим воздействием по начальному температурному состоянию прессуемой заготовки, которое, в свою очередь, обеспечивается на этапе нагрева в индукционной нагревательной установке с заданным градиентом температуры по длине заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rudnev V.I. et al. Handbook of induction heating. N.Y.: Marcel Dekker. 2003. 797 p.
2. Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. London, N.Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2007. 349 p.
3. Афиногентов А.А. Моделирование процесса деформации металлических заготовок цилиндрической формы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2007. – № 2 (15). – С. 170-172.
4. Афиногентов А.А. Моделирование и оптимальное управление технологическим комплексом «нагрев – обработка металла давлением»: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 22 с.
5. Перлин И.Л., Гайтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Metallurgy, 1975. – 448 с.
6. Пleshivtseva Ю.Э., Афиногентов А.А. Оптимальное управление энерготехнологическими процессами в производственных комплексах // Изв. вузов. Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 51-55.
7. Пleshivtseva Ю.Э., Афиногентов А.А., Коршиков С.Е. Параметрическая оптимизация температурного профиля нагреваемой заготовки перед прессованием // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 2 (26). – С. 196-203.

Статья поступила в редакцию 5 июня 2015 г.

EFFICIENT STRATEGIES FOR OPERATION OF PRODUCTION COMPLEX «INDUCTION HEATING – METAL HOT FORMING»

A.A. Afinogentov, M.Yu. Derevyanov

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

The paper discusses the strategy of output at the industrial complex "Induction heating – Metal hot forming", which includes an induction heating unit and a hydraulic press. Production costs are considered as the main efficiency indicators of the industrial complex. For fixed costs the dependence of energy consumption to produce a unit of output is analyzed. It was found that the strategy of maximum output rate and minimal power consumption are competitive. On the basis of the analyzed strategies are formulated and solved the problem of optimal control of production complex.

Key words: *induction heating, metal hot forming processes, energy efficiency, performance.*

*Alexander A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*