

ВЫБОР И УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ВАННАХ

И.В. Милованов, С.А. Васильев

Кафедра «Системы автоматизированного проектирования», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: гальванические покрытия; индивидуальные тепловые режимы; интегрированная система; температура процесса.

Аннотация: Предлагается методика расчета и прогнозирования температурных режимов осаждения гальванических покрытий. Для получения требуемого качества покрытия используется проведение гальванического процесса на индивидуальных температурных режимах.

Температура электролита оказывает двойное влияние на ход процесса осаждения покрытия на поверхности деталей: при ее повышении увеличивается скорость диффузии ионов, а следовательно, уменьшается концентрационная поляризация. Это позволяет вести процесс при более высоких плотностях тока. В то же время, влияние повышенной температуры приводит к снижению перенапряжения, способствующему образованию осадков крупнокристаллической структуры, что снижает качество осадка. На практике нанесение электрохимических покрытий производится с учетом взаимно противоположных влияний плотности тока и температуры – процессы ведутся на интенсивных режимах: при высоких плотностях тока и при повышенной температуре электролита.

Чаще всего необходимую температуру электролита получают путем его нагрева специальными нагревательными устройствами, выполненными в виде змеевиков, расположенных на дне ванны или на ее продольных стенках. Для нагрева ванн рабочим объемом более 2 м³ применяют специальные рубашки вокруг корпуса ванны.

При использовании в качестве теплоносителя насыщенного водяного пара удается получать температуры электролита до 60 °С. Изменением давления теплоносителя в нагревательном устройстве можно достаточно точно регулировать температуру нагрева. Для высоких температур (100 °С и выше) используют электрические нагреватели. Однако ввиду высокой стоимости электроэнергии этот способ нагрева применим только в исключительных случаях.

Сравнительно небольшие отклонения температуры электролита от значения, соответствующего оптимальному режиму осаждения покрытия, приводят к существенному ухудшению качества покрытия. Изменение температуры на 1 °С приводит к изменению электропроводности приблизительно на 4 %, что, например, при цинковании в кислом электролите приводит к погрешности контроля и регулирования плотности тока до 15 % и более.

Промышленные двух- и трехпозиционные регуляторы температуры позволяют регулировать температуру с точностью 3-4 °С, что, как правило, достаточно для большого количества гальванических процессов осаждения покрытий на поверхности деталей, не требующих высокого качества покрытия, или в автоматических гальвани-

ческих линиях, настроенных на однотипные детали и работающих по жестко составленным программам управления, так называемых циклограммам. Применение таких линий в современных условиях хозяйствования возможно только на очень ограниченном количестве предприятий, выпускающих очень большие количества деталей с одинаковыми покрытиями. Чаще всего на предприятиях требуется наносить на поверхности деталей покрытия с индивидуальными параметрами и характеристиками.

Невысокая точность регулирования температуры объясняется тем, что регуляторы, как правило, только отключают или изменяют подачу теплоносителя в нагревательные устройства и не оснащены охладителями, а следовательно, не могут охладить электролит. Кроме того, регуляторы не могут прогнозировать унос тепла деталями, погружаемыми в ванну для обработки, и дополнительный подогрев электролита ванны теплом, выделяемым электрическим током. Эти величины тепла возможно получить только от системы управления переносом деталей между гальваническими ваннами, точно учитывающими характеристики деталей и их количество в гальванической ванне.

Авторами предлагается совместить управление температурными режимами гальваническими ваннами с управлением перемещением деталей в линии на основе микропроцессорных ЭВМ и микроконтроллеров. Такие интегрированные системы позволят для каждой партии деталей, погружаемых в ванну на обработку, выбирать и поддерживать индивидуальные оптимальные значения температуры, доставляющие требуемое качество покрытия.

Для разработки схемотехники и программного обеспечения интегрированных систем управления предлагается следующая методика тепловых расчетов гальванической ванны.

Разогрев электролита первоначально производится при подготовке гальванической ванны к работе, т.е. в начале рабочей смены. Количество теплоты $Q_{\text{раз}}$ складывается из расхода тепла Q_1 на разогрев раствора и материала ванны и ее узлов, и расхода тепла Q_2 на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду гальванического цеха

$$Q_{\text{раз}} = Q_1 + Q_2, \text{ Дж.}$$

Количество тепла Q_1 может быть рассчитано по формуле

$$Q_1 = \left(V C_p^{\text{э}} \rho^{\text{э}} + \sum_{i=1}^n C_{p_i} M_i \right) (t_k - t_n), \text{ Дж,}$$

где V – объем электролита в гальванической ванне в м^3 ; $C_p^{\text{э}}$ – удельная массовая теплоемкость электролита в $\text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; $\rho^{\text{э}}$ – плотность раствора в $\text{кг}/\text{м}^3$; C_{p_i} – удельная массовая теплоемкость i -й сборочной единицы конструкции гальванической ванны в $\text{дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; M_i – масса i -й сборочной единицы ванны в кг ; t_n – начальная температура электролита в $^{\circ}\text{C}$; t_k – рабочая температура электролита в $^{\circ}\text{C}$.

Тепловые потери в окружающую среду гальванического цеха состоят из потерь тепла q_1 нагретого электролита через стенки ванны (теплопроводностью, конвекцией и лучеиспусканием) и потерь тепла q_2 на испарение электролита с открытой поверхности

$$Q_2 = q_1 + q_2, \text{ Дж.}$$

Потери тепла через стенки ванны

$$q_1 = k F \tau (t_{\text{э}} - t_{\text{с}}), \text{ Дж,}$$

где k – коэффициент теплопередачи в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; F – поверхность корпуса гальва-

нической ванны в m^2 ; τ – время разогрева электролита в с; t_3 – температура электролита, отдающего тепло, в $^{\circ}C$; t_c – температура окружающего воздуха гальванического цеха в $^{\circ}C$.

$$k = 1 / \left(1/\alpha_1 + \sum_i R_i + 1/\alpha_2 \right), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи на граничных поверхностях стенки с внутренней и наружной средами в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\sum_i R_i$ – суммарное термическое сопротивление слоев стенки гальванической ванны в $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $R_i = \delta_i / \lambda_i$, $i = 1, 2, 3$, δ_i – толщина i -го слоя стенки ванны в м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки ванны в $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 рассчитываются по следующей методике.

а) α_1 находится в зависимости от произведения безразмерных критериев Грасгофа Gr и Прандтля Pr:

$$\text{Gr} = \beta l^3 g \Delta t / \nu^2; \text{Pr} = \mu c_p / \lambda;$$

где β – коэффициент объемного расширения электролита ванны в $1/\text{град}$; l – высота стенки ванны в м; g – ускорение силы тяжести в $\text{м}/\text{с}^2$; Δt – разность температуры жидкости и температуры стенки ванны со стороны жидкости в $^{\circ}C$; ν – кинематическая вязкость электролита в $\text{м}^2/\text{с}$; μ – динамическая вязкость электролита в $(\text{Па} \cdot \text{с})$; c_p – удельная массовая теплоемкость электролита в $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$; λ – коэффициент теплопроводности электролита в $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Если $\text{Gr Pr} < 0,7 \cdot 10^{12}$, то $\alpha_1 = 0,07 (\beta g \text{Pr})^{1/3} \lambda (\Delta t/l) / \nu^{2/3}$, в противном случае $\alpha_1 = 0,009 (\beta g \text{Pr})^{1/3} \lambda (\Delta t/l) / \nu^{2/3}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

б) коэффициент теплоотдачи α_2 от стенки корпуса гальванической ванны к окружающему воздуху при температуре стенок ванны от 50 до 350 $^{\circ}C$ рассчитываются по эмпирической формуле В.Н. Линчевского [1]:

$$\alpha_2 = 9,3 + 0,06 t_{cm}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где t_{cm} – температура наружной поверхности гальванической ванны в $^{\circ}C$.

Потери тепла на испарение q_2 определяются с помощью следующего выражения:

$$q_2 = (5,7 + 4,1v)(t_3 - t_c) \tau F', \text{ Дж.}$$

где v – скорость движения воздуха над поверхностью электролита в $\text{м}/\text{с}$; t – температура воздуха над поверхностью электролита в $^{\circ}C$; τ – время разогрева электролита ванны в сек; F' – площадь поверхности электролита в м^2 .

Нагревание электролита в ванне необходимо не только в период подготовки ванны к работе, но и в процессе ее работы. Потребность в подогреве электролита обусловлена, главным образом, уносом тепла деталями, загруженными в ванну на обработку. Для ванн, работающих без электрического тока, количество тепла для поддержания рабочей температуры вычисляется по формуле [2]:

$$Q_{\text{раб}} = Q_2 + Q_3 = Q_2 + \sum_i (C_{p_i} m_i)(t_k - t_n), \text{ Дж,}$$

где Q_2 – тепловые потери в окружающую среду гальванического цеха; $m_i = M/\tau^1$ – масса загружаемого металла в ванну за 1 с; M – масса единовременной загрузки деталей в ванну в кг; C_{p_i} – удельная массовая теплоемкость загружаемых деталей в ванну

в кг Дж/(кг · К); τ^1 – время работы гальванической ванны в с.

Для ванн, работающих с использованием тока, необходимое для поддержания рабочей температуры количество тепла несколько меньше из-за дополнительного выделяемого тепла электрическим током (джоулево тепло):

$$Q_{\text{раб}} = Q_2 + Q_3 - Q_4 = Q_2 + \sum_i (C_{p_i} m_i) (t_k - t_n) - I^2 R \tau^1, \text{ Дж}$$

где I – сила тока, проходящего через электролит в А; R – омическое сопротивление электролита в Ом.

Если по расчету джоулево тепло выделяется в большем количестве, чем расходуется тепло в окружающую среду гальванического цеха (а также при перегреве раствора по другим причинам), необходимо ванну охлаждать при помощи тех же устройств, что и для нагрева.

Если ванна обогревается насыщенным водяным паром, то его расход в период разогрева и работы определяется формулами:

$$P_{\text{раз}} = Q_{\text{раз}} / (q' - q''), \text{ кг}; \quad P_{\text{раб}} = Q_{\text{раб}} / (q' - q''), \text{ кг},$$

где q' – теплосодержание 1 кг входящего пара в Дж/кг; $q'' = \theta C_p$ – теплосодержание 1 кг уходящего конденсата в Дж/кг; θ – температура уходящего конденсата в °С; C_p – удельная массовая теплоемкость воды в Дж/(кг · К).

Охлаждение электролита в ванне может быть осуществлено различными способами: внесением льда в электролит, холодильным рассолом или водой, циркулирующими в змеевиках или рубашке ванны, охлажденным воздухом или же использованием специальных холодильных установок. Наиболее широкое распространение получило охлаждение электролита водой, необходимое количество которой рассчитано по формуле [3]:

$$M = Q / (C_p (t_2 - t_1)), \text{ кг},$$

где Q – количество тепла, отводимого от электролита ванны в Дж, t_1 – температура воды, входящей в рубашку в °С, t_2 – температура воды, выходящей из рубашки в °С; C_p – удельная массовая теплоемкость воды в Дж/(кг · К).

Рабочую поверхность устройства для нагрева электролита рассчитаем по формуле:

$$S = Q / K t_{\text{ср}} \tau, \text{ м}^2,$$

где $t_{\text{ср}}$ – средняя температура в °С, τ – время разогрева или работы гальванической ванны в сек; K – коэффициент теплопередачи в Вт/(м² · К).

Средняя температура:

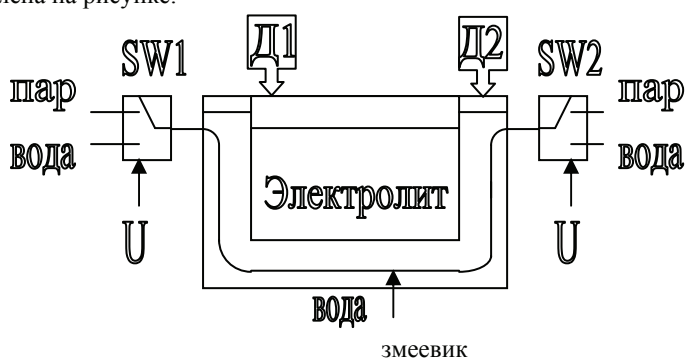
$$t_{\text{ср}} = \left(\frac{(t_1 - t_2) - (t_3 - t_4) / (\ln(t_1 - t_2) / (t_3 - t_4))}{1} \right), \text{ } ^\circ\text{C},$$

где t_1 – начальная температура пара в °С; t_2 – начальная температура раствора в °С; t_3 – температура конденсата в °С; t_4 – конечная температура электролита в °С. При определении коэффициента теплопередачи K задается толщина стенки гальванической ванны.

Если принять развернутую длину змеевика за L , то наружный диаметр труб равен $d = S / (\pi \cdot L)$, м.

Проведенный анализ изменения тепловых режимов ванны при осаждении покрытия на поверхности деталей в промышленных условиях гальванического цеха позволяет синтезировать типовую схему системы управления температурой, которая

представлена на рисунке.



где Д1 и Д2 – датчики температуры электролита и воды в греющей рубашке; SW1 и SW2 – смесители греющего пара и охлаждающей воды; U – управляющие сигналы от микроконтроллера на переключение режимов нагрева или охлаждения электролита гальванической ванны паром или холодной водой.

Для формирования управляющего сигнала U предлагается алгоритм, позволяющий на основе технических средств системы управления температурой устанавливать индивидуальные оптимальные температурные режимы для обрабатываемых деталей.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Измерить текущую температуру гальванической ванны.

Шаг 2. Если ванна занята обработкой деталей, то вычислить температуру электролита ванны на момент окончания процесса осаждения покрытия.

Шаг 3. Получить из системы управления транспортными средствами планируемое время загрузки деталей в ванну.

Шаг 4. Вычислить температуру электролита в ванне на планируемое время начала процесса осаждения покрытия.

Шаг 5. Рассчитать продолжительность вывода температуры в ванне на индивидуальные оптимальные значения для обрабатываемых деталей.

Шаг 6. Сформировать для микроконтроллера последовательность команд, реализующую вывод ванны на требуемые температурные режимы.

Шаг 7. За $t_{\text{раз}}$ до планируемого начала процесса осаждения покрытия измеряется температура электролита ванны и проверяется правильность вывода на необходимые температурные режимы. В случае отклонения от необходимых параметров переход к шагу 5.

Рассмотренная методика расчета тепловых процессов осаждения гальванических процессов позволяет сократить энергетические затраты на проведение процесса, так как гальваническая ванна нагревается не постоянно, а только в специально определенные моменты времени. Кроме этого, появляется возможность для каждой группы деталей проводить процесс при индивидуальных оптимальных тепловых режимах.

Список литературы

1. Ильин В.А., Ямпольский А.М. Краткий справочник гальванотехника. – Л.: Машиностроение, 1991. - 269 с.
2. Белкин В.П. Схемы моделирования на аналоговых вычислительных машинах электролитических ванн для автоматического регулирования температуры электролита. - М.: ГОСИНТИ, 1978, 3-67-1295/45.
3. Друченко В.А., Зубков М.Е., Малютяк Ю.И. Автоматизация контроля и регулирования гальванических процессов. - М.: ЛДНТП, 1963. - 36 с.

Choice and Control of Temperature Modes in Electroplating Baths

I.V. Milovanov, S.A. Vasilyev

Department "System of Automated Design", TSTU

Key words and phrases: electroplating coating; process temperature; individual temperature modes; integrated system.

Abstract: Methods of calculating and forecasting temperature modes for deposition of electroplating coating are suggested. To obtain the required quality of coating the system of conducting electroplating process at individual temperature modes is used.

Auswahl und Steuerung von Temperaturregimen in den Elektrolyseuren

Zusammenfassung: Es wird die Methodik der Rechnung und Prognostizierung der Temperaturregime der Fällung von den galvanischen Überzügen vorgeschlagen. Für die Erhaltung der nötigen Qualität des Überzuges wird es das System der Durchführung des galvanischen Prozesses in den individuellen Temperaturregimen angewandt.

Choix et commande des régimes thermiques dans les bains galvaniques

Résumé: On propose la méthode du calcul et de la prévision des régimes thermiques de la déposition des surfaces galvaniques. Pour revoir la qualité nécessaire de la surface on utilise le système du processus galvanique dans le régime individuel.
