

В. А. Тарасов, А. Н. Алексеев,  
А. Н. Королев, Ю. А. Цебро

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОПЕРАЦИОННОМ МОДУЛЕ НИКЕЛИРОВАНИЯ С МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМОЙ ПРОМЫВКИ ДЕТАЛЕЙ**

*Для проектирования операционных модулей никелирования с распределенной системой промывки деталей установлены закономерности изменения концентрации электролита на поверхностях деталей и в системе промывки, что необходимо для сокращения потребления воды и ценных химических соединений.*

**E-mail: alxnik@mail.ru**

**Ключевые слова:** никелирование, система промывки, концентрация электролита, операционный модуль.

Процессы гальванохимической обработки (ГХО) представляют собой совокупность операций, реализуемых технологическими модулями [1, 2] в определенной последовательности. В соответствии с работами [3, 4] в технологических модулях линий гальванического производства целесообразно иметь несколько ступеней промывки: одну-две ступени предварительной струйной промывки и ступень заключительной диффузионной промывки погружением. Это позволяет повысить качество и сократить время промывки деталей, снизить потери воды и ценных химических соединений процессной ванны вследствие оптимизации водообмена между ступенями промывки.

Однако при проектировании многоступенчатой системы промывки необходимо знать закономерности изменения концентраций отмываемых электролитов в баках и (или) ваннах для промывки деталей.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию процесса изменения концентрации электролита в технологической системе операционного модуля никелирования с многоступенчатой системой промывки деталей, размещаемых на подвесках.

Методика исследования состояла в том, что промывке подвергались детали на подвесках с площадью поверхности  $1 \text{ м}^2$ . Объем баков составляет  $0,5 \text{ м}^3$ . Концентрацию основных отмываемых компонентов электролита ГХО измеряли в отобранных из соответствующих сборников-дозаторов и баков пробах отмывающего раствора используемых ступеней промывки.

При проведении исследований были использованы фотометрический и электрохимический методы измерения концентраций основного отмываемого компонента (ООК) в растворах [1, 5] с чувствитель-

ностью 10...50 и 1...10 мг/м<sup>3</sup> соответственно. Наиболее распространенным фотометрическим методом с помощью фотоэлементов сравнивали интенсивности световых потоков, проходящих через эталонный и анализируемый растворы. В электрохимическом методе с помощью кондуктометров определяли суммарное содержание компонентов электролитов по удельной электропроводности с помощью предварительно построенного тарифовочного графика.

Струйная промывка выполнялась в течение 4 с при подъеме подвески со скоростью 0,16 м/с (ширина зоны промывки — 0,8 м). Время диффузионной промывки погружением составляло 1 ч (вместо 1 — 2 мин, регламентированных технологическим процессом).

При струйной промывке использовались панели с соплами коноидальной формы, формирующие пакет струй диаметром 0,7 мм. Чтобы обеспечить воздействие струй на все без исключения точки проекции поверхности деталей на вертикальную плоскость, в панели необходимы 156 сопел. Сопла должны быть расположены в два ряда со смещением ( $\Delta$ ) осей отверстий, определяемым из соотношения

$$d < \Delta < 1,5d,$$

где  $d$  — выходной диаметр соплового отверстия.

В качестве основного отмываемого компонента электролита ГХО выбран серноокислый никель с концентрацией 250...300 кг/м<sup>3</sup>.

Результаты измерения концентраций ООК на деталях, в сборниках-дозаторах и баках ступеней промывки приведены на рис. 1.

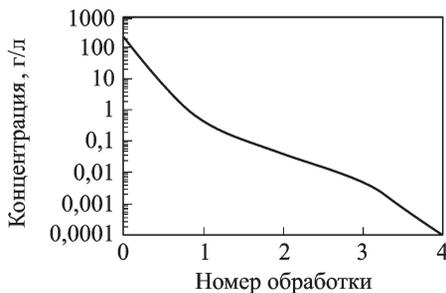
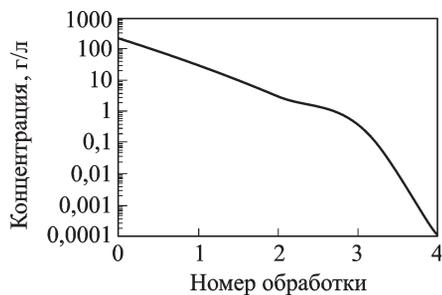
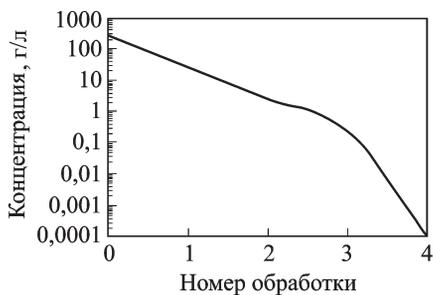
Полученные экспериментальные результаты служат для обоснования целесообразной интенсивности массопереноса отмываемого электролита между процессной ванной, баками ступеней струйно-динамической промывки и ванной для промывки погружением операционного модуля (ОМ).

Составляя баланс масс для процесса перемещения ООК с деталей в сборники-дозаторы и баки промывочной жидкости, получили соотношения для определения толщины  $\Delta\delta$  слоя, удаляемого с поверхностей деталей при струйной промывке и промывке погружением:

$$\Delta\delta \approx \delta = \frac{8qt_{\text{стр}}}{S} \frac{K_i^{\text{doz}}}{K_{i-1} - K_i^{\text{doz}}}, \quad (1)$$

$$\Delta\delta \approx \delta = \frac{\vartheta}{S} \frac{K_i}{K_{i-1} - K_i}, \quad (2)$$

где  $q$  — расход отмывающего раствора через одну струеформирующую панель;  $t_{\text{стр}}$  — время струйной промывки;  $S$  — площадь поверхности деталей на подвеске;  $K_i^{\text{doz}}$ ,  $K_i$  — концентрации ООК в сборнике-дозаторе и баке промывочной воды объемом  $\vartheta = 0,5\text{ м}^3$   $i$ -й ступени промывки;



**Рис. 1. Концентрация ООК:**

*a* — на поверхностях деталей по ступеням промывки; *б* — в жидкости сборников-дозаторов; *в* — в жидкости баков ступеней промывки

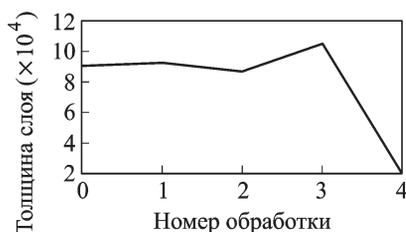
$K_{i-1}$  — концентрация ООК в баке промывной воды ( $i - 1$ )-й ступени. Цифра 8 в соотношении (1) означает, что подвеска подвергается промывке с двух сторон с помощью восьми панелей.

Толщина слоя  $\Delta\delta$  в соответствии с принятыми допущениями близка к толщине слоя  $\delta$ , выносимого из ванны предыдущей ступени при перемещении подвесок между ваннами операционного модуля ГХО.

Результаты оценки толщин переносимого на деталях слоя ООК для разных ступеней обработки приведены на рис. 2.

В то же время для задач проектирования гальванических линий важна оценка толщины выносимого слоя электролита, что связано с технологическими параметрами промывки.

Для установления факторов, влияющих на толщину слоя отмываемого раствора на поверхностях деталей, предположим, что боковая поверхность деталей имеет площадь  $S$ . Детали извлекаются со скоростью  $v$ . Возле поверхности деталей образуется пограничный слой



**Рис. 2. Толщина слоя ООК на поверхностях деталей по ступеням промывки**

жидкости толщиной  $\delta$ . На поверхности детали массовая скорость совпадает со скоростью детали, а на внешней поверхности слоя она равна нулю.

Сдвиговые деформации в поверхностном слое, которые в настоящей работе приближенно приняты равными  $\xi = v/\delta$ , вызывают появление касательных напряжений  $\tau = \mu\xi$  и определяют вынос массы электролита из процессной ванны, где  $\mu$  — вязкость электролита (наряду с другими технологическими факторами: площадью поверхности деталей на подвеске, сложностью профиля деталей, влиянием поверхностного натяжения электролита/раствора и др.).

Условием подъема массы электролита над процессной ванной на поверхностях деталей можно принять равенство сил тяжести и касательных сил, действующих на поверхностный слой электролита. Отсюда толщину поверхностного слоя можно оценить как

$$\delta = \omega_1 \sqrt{\frac{\mu v}{g\rho}}, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  — поправочный коэффициент,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho$  — плотность электролита.

При последующем удержании деталей над процессной ванной электролит будет стекать с их поверхностей, а толщина поверхностного слоя будет уменьшаться.

Запишем баланс стекающих масс в интегральной форме

$$H(\delta - \delta_t) = 2 \int_0^t U \delta dt,$$

где  $H$  — высота детали,  $U$  — скорость стекания жидкости в центре площади деталей,  $\delta_t$  — толщина пленки в момент  $t$ .

Дифференцируя, получаем

$$\frac{d\delta_t}{dt} = -\frac{2\delta_t U}{H}. \quad (4)$$

Уравнение движения воды под действием сил тяжести и вязкости представим в виде

$$m \frac{dU}{dt} = gm - \frac{2H\mu U}{\delta_t}$$

и запишем его в приближенной форме

$$\frac{dU}{dt} = g - \frac{2\mu U}{\rho\delta^{*2}},$$

где  $\delta^* = \frac{(\delta + \delta_{\min})}{2}$ ;  $\delta_{\min}$  — минимальная толщина пленки, которая, в соответствии с работой [1], равна 0,2 мм.

Решение уравнения имеет вид

$$U = \frac{\rho\delta^{*2}g}{2\mu} \left( 1 - e^{-\frac{2\mu t}{\rho\delta^{*2}}} \right). \quad (5)$$

Подставляя (5) в уравнение (4), получаем

$$\delta_t = \delta \exp\left(-\frac{\rho\delta^{*2}gt}{\mu H}\right) \times \exp\left\{-\frac{2g}{H}\left(\frac{\rho\delta^{*2}}{2\mu}\right)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{2\mu t}{\rho\delta^{*2}}\right)\right]\right\}. \quad (6)$$

При  $\frac{2\mu t}{\rho\delta^{*2}} \ll 1$  выражения (5) и (6) примут вид

$$U = gt \left( 1 - \frac{\mu t}{\rho\delta^{*2}} \right);$$

$$\delta_t = \delta e^{-\frac{gt^2}{H} \left( 1 - \frac{2\mu t}{3\rho\delta^{*2}} \right)}. \quad (7)$$

Если существуют ограничения по допустимому выносу электролита из процессной ванны ( $\delta_{\text{доп}}$ ), то из соотношения (3) можно определить ограничение на скорость извлечения деталей из процессной ванны:

$$V \leq \frac{g\rho\delta_{\text{доп}}^2}{\omega_1^2\mu}. \quad (8)$$

Уравнения (6)–(8) образуют модель стекания раствора с поверхностей деталей, которую можно использовать для расчета времени экспозиции подвески с деталями над ванной.

Важными характеристиками интенсивности и качества промывки являются закономерности изменения концентраций  $C_i$  во времени, которые в соответствии с данными работ [2, 6] для струйной и погружной промывок описываются соотношениями:

$$C_i = C_{i-1} \exp(-\alpha_{\text{стр}} t_{\text{стр}}), \quad C_i = C_{i-1} \exp(-\alpha_{\text{пог}} t_{\text{пог}}),$$

где  $\alpha_{\text{стр}}$  и  $\alpha_{\text{пог}}$  — константы промывки при известном времени промывки, которые могут быть найдены из экспериментальных данных

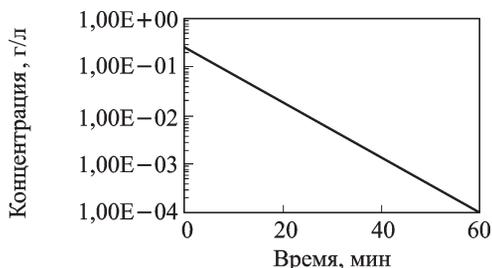
$$\alpha_{\text{стр}} = 0,576 \quad \text{и} \quad \alpha_{\text{пог}} = 0,00217, \quad \text{с}^{-1}.$$

Последняя константа получена из графика изменения концентрации электролита на поверхностях деталей при промывке погружением (рис. 3).

Однако время фактического воздействия струй на точку поверхности деталей равно  $2d/v$ , поэтому

$$\alpha_{\text{стр}}^* = \alpha_{\text{стр}} \frac{t_{\text{стр}} V}{2d} = 263 \text{ с}^{-1}.$$

Рис. 3. Изменение концентрации электролита на поверхностях деталей при промывке погружением



Можно также уточнить величину  $\alpha_{\text{пог}}$ , учитывая, что скорость диффузии ООК в ванне промывки погружением невелика и после удаления слоя  $\Delta\delta$  с помощью струйной промывки на поверхности детали образуется слой гетерогенной структуры, где внешний слой толщиной  $\Delta\delta$  представляет собой чистую воду, а слой  $\delta_4 = \delta_3 - \Delta\delta$  имеет концентрацию ООК  $C_2$ . В этом случае  $\alpha_{\text{пог}}^* = 0,00281 \text{ с}^{-1}$ .

Для проектирования гальванических линий важное значение имеет теоретическая оценка значений  $\alpha_{\text{стр}}$  и  $\alpha_{\text{пог}}$ .

В соответствии с работой [6], где исследовался механизм струйной промывки, принимаем, что струя толщиной  $d$  со скоростью  $W$  падает по нормали на жесткую плоскость, покрытую жидким слоем отмываемого раствора толщиной  $\delta$  (рис. 4).

Оценим скорость  $D$  внедрения струи в жидкую пленку отмываемого компонента по формуле

$$D = \frac{W}{2} \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\rho W H} \left(1 + \frac{d}{\chi \delta}\right)},$$

где  $H$  — расстояние от вершины струи до отмываемой поверхности;  $x, y$  — координатная плоскость движения отмываемого раствора;  $U_x, U_y$  — компоненты массовой скорости движения отмываемого раствора под действием струи,  $W$  — скорость движения детали относительно струи.



Рис. 4. Расчетная схема струйного удаления отмываемого раствора

Интегрируя уравнение удаления отмываемого компонента

$$\frac{dH}{dt} = -D$$

при начальном условии  $H|_{t=0} = \delta$ , получаем

$$t(H) = t_1 + t_2,$$

где  $t_1(H) = \frac{2\delta}{W} \left[ 1 - \frac{H}{\delta} \right]$ ;  $t_2(H) = \frac{2\mu}{\rho W^2} \left( 1 + \frac{d}{\chi\delta} \right) \ln \frac{\delta}{H}$ .

Традиционно в качестве аппроксимирующей зависимости выбираем зависимость  $H = \delta e^{-\alpha_{\text{стр}} t}$ . Константу  $\alpha_{\text{стр}}$  находим, приравняв интегралы

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2,$$

где

$$I_{\Sigma} = \int_0^{\infty} H dt = \frac{\delta}{\alpha_{\text{стр}}}, \quad I_1 = \int_0^{\delta} t_1 dH = \frac{\delta^2}{W},$$

$$I_2 = \int_0^{\delta} t_2 dH = \int_0^{\infty} H dt_2 = \frac{2\mu\delta \left( 1 + \frac{d}{\chi\delta} \right)}{\rho W^2}.$$

Выражения для интегралов  $I_1$  и  $I_2$  получены из условия

$$\int_0^{\infty} H dt = \int_0^{\delta} t dH.$$

Отсюда интенсивность струйной промывки деталей определяем как

$$\omega_2 \alpha_{\text{стр}} = \frac{\frac{\rho W^2}{2\mu}}{\frac{\rho W^2}{2\mu} \frac{\delta}{W} + 1 + \frac{d}{\chi\delta}}, \quad (9)$$

где  $\omega_2$  — поправочный коэффициент.

В основе снижения концентрации в ванне погружения лежит диффузионный процесс, который описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

где  $\eta$  — коэффициент диффузии,  $x$  — координата точки пленки отмываемого компонента,  $t$  — время диффузии.

Оценить интенсивность диффузионной очистки можно в предположении, что  $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{C}{\delta^2}$ . В результате уравнение диффузии примет

вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \omega_3 \eta \frac{C}{\delta^2},$$

где  $\omega_3$  — поправочный коэффициент.

Для границы раздела отмываемый компонент–вода в рамках сделанных допущений получаем решение

$$C_4 = C_2 \exp(-\alpha_{\text{пог}}^* t), \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{пог}}^* = \frac{\omega_3 \eta}{\delta^2}$ ,  $\omega_3$  — поправочный коэффициент.

И наконец, представляет интерес описание накопления концентрации отмываемого компонента в баках ступеней промывки при длительной эксплуатации гальванической линии.

Составим баланс масс в баке струйной промывки. В каждый момент времени масса жидкости в баке складывается из массы промывной жидкости, находившейся в баке  $(\rho + K_i^*) \vartheta$ , и массы жидкости, удаленной струей с поверхностей деталей  $(\rho + C_{i-1}) \Delta \delta S$ . Эту массу можно представить как  $(\rho + K_i^* + \Delta K_i^0) (\vartheta + \Delta \delta S)$ , где  $\Delta K_i^0$  — изменение концентрации в баке после промывки одной подвески.

В этом случае закон накопления концентрации в баке можно записать как

$$\frac{dK_i^*}{dt_{\text{экс}}} = (C_{i-1} - K_i^*) \frac{N}{1 + \frac{\vartheta}{\Delta \delta S}}, \quad (11)$$

где  $N$  — число подвесок, подвергаемых струйной промывке в 1 ч;  $t_{\text{экс}}$  — время эксплуатации гальванической линии после смены воды в баке струйной промывки.

Решение уравнения (11) имеет вид

$$K_i^* = K_{i0}^* + (C_{i-1} - K_{i0}^*) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{N t_{\text{экс}}}{1 + \frac{\vartheta}{\Delta \delta S}} \right) \right], \quad (12)$$

где  $K_{i0}^*$  — исходная концентрация ООК в промывной жидкости в  $i$ -й ступени промывки.

Аналогичное соотношение можно получить для ванны, предназначенной для промывки погружением ( $i = 4$ ):

$$K_{i=4} = (C_2 - K_{i0}^*) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\omega_4 S \delta_4 N t_{\text{экс}}}{\vartheta} \right) \right] + K_{i0}^*, \quad (13)$$

где  $\omega_4$  — поправочный коэффициент.

При медленном накоплении концентрации выражения (12) и (13) приобретают следующую линейную форму:

$$K_i^* = K_{i0}^* + (C_{i-1} - K_{i0}^*) \frac{Nt_{\text{экс}}}{\vartheta} \frac{1}{1 + \frac{S\Delta\delta}{\vartheta}};$$
$$K_{i=4} = (C_2 - K_{i0}^*) \frac{\omega_4 S \delta_4 N t_{\text{экс}}}{\vartheta} + K_{i0}^*.$$

В результате экспериментального исследования накопления ООК в ванне промывки погружением при никелировании получена зависимость

$$K_{i=4}^* = 0,000118t_{\text{экс}},$$

где  $t_{\text{экс}}$  — время эксплуатации ванны для промывки погружением операционного модуля в часах.

Таким образом можно сделать следующие выводы.

1. Установленные закономерности по изменению концентрации электролита на поверхностях деталей и в системе распределенной промывки являются основой при разработке ресурсосберегающих операционных модулей никелирования гальванического производства.

2. Предложенный подход может быть использован при изучении таких процессов гальванохимической обработки, как обезжиривание, травление и другие, в том числе при обработке мелких деталей в технологических приспособлениях в виде перфорированных барабанов.

*Работа выполнена в рамках проекта № 2.1.2/1398 аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)”.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г и б к и е автоматизированные гальванические линии: Справочник / Под общ. ред. В.Л. Зубченко. — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.
2. А л е к с е е в А. Н. Метод проектирования оптимальной структуры системы распределенной многоступенчатой струйной противоточной промывки бессточной линии гальванохимической обработки и/или очистки общего вида // Новые промышленные технологии. — 2003. — № 5. — С. 14–23.
3. А л е к с е е в А. Н., Т а р а с о в В. А. Аналитическое описание конструктивно-технологических параметров высокоэффективных насадков и операций струйной очистки в процессах гальванохимической обработки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2003. — № 4. — С. 84–95.
4. А л е к с е е в А. Н., Т а р а с о в В. А. Разработка и внедрение струйной пакетной технологии для очистки поверхностей деталей на предприятиях машиностроительного комплекса // Инженерный журнал: Справочник. — 2003. — № 12. — С. 6–10.
5. М а с л о в Н. Н., П л у т о в В. И. Прогрессивные способы очистки деталей. — Л.: ЛДНТП, 1971. — 36 с.

6. Тарасов В. А., Алексеев А. Н., Филимонов А. С., Королев А. Н. Технологические факторы гидроструйной очистки поверхностей деталей в операционном модуле гальванического производства / Полет. – 2009. – № 12.

Статья поступила в редакцию 12.10.2010

Владимир Алексеевич Тарасов родился в 1946 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор более 150 научных работ в области технологии машиностроения.

Tarasov V.A. (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Technologies of Rocket and Space Machinery” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of production engineering of machinery.



Андрей Николаевич Алексеев — д-р техн. наук. Автор более 100 научных работ в области гальванического производства.

A.N. Alekseev — D. Sc. (Eng.), author of more than 100 publications in the field of galvanic production.



Александр Николаевич Королев родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ассистент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор 7 научных работ в области неразрушающего контроля и гальванического производства.

A.N. Korolev (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Technologies of Rocket and Space Machinery” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of nondestructive inspection and galvanic production.



Юрий Анатольевич Цебро родился в 1979 г., окончил в 2003 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области технологии машиностроения.

Yu.A. Tsebro (b. 1979) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Author of 5 publications in the field of production engineering of machinery.

