

### Список литературы

1. Справочник по строительной механике корабля / под ред. Ю. А. Шиманского. — Л.: Судпромгиз, 1958. — Т. 1, 2.
2. Ершов Н. Ф. Предельное состояние и надежность конструкций речных судов / Н. Ф. Ершов, О. И. Свечников. — Л.: Судостроение, 1970.
3. Российский речной Регистр. Правила. — М.: По Волге, 2002. — Т. 1.
4. Российский речной Регистр. Правила. — М.: По Волге, 2002. — Т. 2.
5. Беленький Л. М. Повышение несущей способности днищевых перекрытий / Л. М. Беленький, В. В. Макаров // Судоремонт флота рыбной промышленности.
6. Барышников С. О. Расчет редуцированных коэффициентов элементов корпуса судна по Правилам Российского речного регистра / С. О. Барышников // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2010. — Вып. 3 (7).
7. Чистов В. Б. Анализ влияния погрешностей в определении остаточных толщин на прочностные характеристики пластин обшивок и настилов корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк, М. Г. Пеликова // Сб. тр. ВБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». — 2013.
8. Чистов В. Б. Оценка влияния погрешностей в определении остаточных толщин на несущие характеристики балок набора корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк // Сб. науч. тр. — СПб.: СПГУВК, 2013.

**УДК 629.122.004.67.002(075.8)**

**Н. М. Вихров,**  
д-р техн. наук,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**В. А. Голицын,**  
канд. техн. наук,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

## ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССА АНОДНО-СТРУЙНОГО ХРОМИРОВАНИЯ

### HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ANOD-JET CHROMIUM-PLATING PROCESS

*В статье обсуждается вопрос влияния конструктивных и гидродинамических параметров перфорированного отверстиями анода, через которые в виде затопленных струй подается электролит в межэлектродное пространство в процессе электроосаждения хрома, на локальное распределение хрома на поверхности катода.*

*The article considers the effect of the structural and hydrodynamic parameters of anode perforated with holes through which electrolyte is fed in the form of submerged jets to the interelectrode space during electrodeposition of chromium on the local distribution of the chromium on the surface of the cathode.*

*Ключевые слова: электролитическое хромирование, истечение затопленной струи, гидродинамические параметры струи, конструктивные параметры анода, локальное распределение хрома на катоде.*

*Key words: electrolytic chrome plating, the expiry of a submerged jet, hydrodynamic parameters of the jet, the design parameters of the anode, the local distribution of chromium on the cathode.*

**П**РОЦЕСС электроосаждения хрома анодно-струйным способом представляет собой в общем ряд разнородных и сложных явлений, которые описываются законами электрохимической кинетики, физики, гидродинамики, подчиняются теории тепломассообмена, а также теории электрического поля. Все эти явления взаимосвязаны, сами по себе сложны и не имеют точного аналитического описания.

Современная теория хромирования отводит решающую роль в процессе образования металлического хрома в период электролиза катодной пленке. Под действием внешних и внутренних условий она способна изменять характер и величину электропроводности, ускорять и замедлять все процессы, происходящие в ней самой, на поверхности катода и прилежащих к ней слоях электролита, изменять свою толщину, плотность, структуру, а также химизм и динамику процесса [7; 8]. Другим важным аспектом, следующим из рассмотрения кинетики электроосаждения хрома, являются теплотехнические процессы, всегда сопровождающие выделение хрома [8]. Условия вынужденной конвекции в зависимости от ее интенсивности ускоряют теплообменные процессы на поверхности электродов и снижают фактическую температуру прикатодного слоя электролита.

Согласно исследованиям [4] скорость движения электролита в межэлектродном зазоре наряду с параметрами электроосаждения определяет относительное газонаполнение межэлектродного объема электролита при хромировании. Это в свою очередь определяет равномерность распределения тока и соответственно металла на катоде. Увеличение объемной скорости электролита в межэлектродном зазоре способствует уменьшению газонаполнения последнего и более равномерному распределению электроосажденного хрома.

Следует отметить, что в процессе электроосаждения хрома циркуляция электролита в межэлектродном пространстве автоматически осуществляется пузырьками газообразного водорода, на выделение которого затрачивается 80 % электроэнергии. Поэтому воздушное перемешивание электролита при хромировании, как правило, не используется.

Появление в электролите пузырьков газа снижает его электропроводность. Это порождает при неравномерном распределении пузырьков в электролите неравномерность распределения тока на электродах. Образующиеся пузырьки газа могут прилипнуть к катоду, удерживаясь длительное время на его поверхности. Это приводит к уменьшению фактической поверхности электрода и изменению величины электродного потенциала; изменяется поляризационная характеристика электрода.

Выделение пузырьков водорода, создавая конвективные потоки, способствует интенсивному перемешиванию слоев электролита, непосредственно прилегающих к электроду. Это приводит к ускорению доставки ионов к электроду, что в результате уменьшает электродную поляризацию. Однако это имеет место для электрохимических процессов с концентрационной кинетикой, что нехарактерно для процесса хромирования.

Газовые пузырьки обычно неравномерно распределяются в межэлектродном зазоре. Это особенно сказывается при большой длине вертикально расположенных электродов. В верхней зоне межэлектродного зазора плотность тока на электродах будет меньше, чем в нижней. Это объясняется увеличением сопротивления электролита с повышением содержания пузырьков водорода.

Скорость подъема газовых пузырьков зависит от радиуса пузырька и кинематической вязкости электролита. Скорость подъема пузырьков диаметром от 0,2 до 0,5 см практически не зависит от их размера и равна 28–30 см/с. Пузырьки большего размера поднимаются со скоростями 35–40 см/с. В случае принудительной циркуляции скорость движения электролита за счет всплытия пузырьков газа суммируется со скоростью вынужденного движения электролита.

В устройствах анодно-струйного хромирования подача электролита в межэлектродный промежуток осуществляется через перфорированный отверстиями или щелями цилиндрический анод в виде затопленных струй.

Под затопленными понимают струи, физические свойства вещества которых одинаковы или мало отличаются от физических свойств среды, в которую они втекают. Схема движения жидкости в затопленной струе показана на рис. 1.

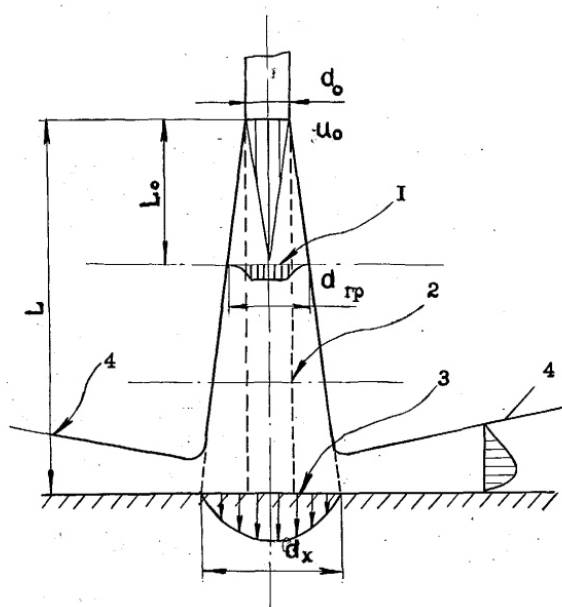


Рис. 1. Структура турбулентной затопленной осесимметричной струи во взаимодействии с экраном:

- 1 — переходный участок;
- 2 — основной участок;
- 3 — зона торможения;
- 4 — веерная пристенная струя;
- $L_0$  — длина начального участка;
- $L$  — длина от среза отверстия до экрана;
- $d_0$  — диаметр отверстия;
- $u_0$  — скорость на оси струи;
- $d_{гр}$  — диаметр струи в переходном сечении;
- $d_x$  — диаметр струи на основном участке струи

радиуса отверстия и является функцией только числа Рейнольдса. С ростом числа Рейнольдса длина неразмытого участка быстро уменьшается и при  $Re > 2320$  он отсутствует (рис. 1).

В устройствах анодно-струйного хромирования осесимметричная струя электролита, вытекающая из отверстия в аноде, со скоростью  $u_0$  распространяется в межэлектродный промежуток с электролитом и соударяется с поверхностью катода (детали). Разворачиваясь, струя настигает на поверхность экрана и превращается в веерную пристенную струю. Наличие твердой стенки на пути движущейся по направлению к ней струи почти не сказывается на параметрах струи, за исключением очень тонкого пристенного слоя, где происходит ее разворот. Поэтому для описания характеристик осесимметричной затопленной струи, натекающей на преграду, можно воспользоваться известными закономерностями свободных затопленных струй.

В работах, посвященных электрохимической обработке металлов [5], указывается, что способ подачи электролита в межэлектродный зазор в значительной степени определяет локальное распределение тока на поверхности анода. Установлено, что при струйном способе подачи электролита в зазор на поверхности детали могут возникать застойные зоны с неустойчивым гидродинамическим режимом на линии встречных потоков электролита после растекания отдельных струй на поверхности анода. Наличие застойных зон определяется количеством и диаметром отверстий. На рис. 2 представлены различные формы проявления взаимодействия затопленных струй на поверхности катода при хромировании. Рельефность проявляется в большей степени с увеличением плотности тока и толщины хромового покрытия. Чтобы создать равномерный гидродинамический

Предполагается, что в начальном или выходном сечении струи величина и направление скорости постоянны по всему сечению. Далее по потоку ядро струи с постоянной скоростью убывает, а по периферии образуется область заторможенной жидкости. Эту область часто называют пограничным слоем струи. Участок от начального сечения до переходного сечения, называется начальным участком. За переходным сечением идет основной участок, в котором область постоянных скоростей отсутствует и пограничный слой занимает все поперечное сечение. Как следует из рис. 1, в основном участке струя с ростом продольной координаты  $x$  по-прежнему расширяется и скорость на оси струи убывает.

Геометрические характеристики и свойства свободных затопленных турбулентных струй (угол расширения струй, изменение радиуса и площади поперечного сечения, расхода, скорости и др.) при высоких числах критерия Рейнольдса ( $Re > 20\,000$ ) весьма подробно изучены Г. И. Абрамовичем [1].

Установлено [2], что неразмытый, почти цилиндрический участок осесимметричной затопленной струи наблюдается только в тех случаях, когда число Рейнольдса, вычисленное по скорости истечения жидкости из отверстия, меньше критического. Относительная длина неразмытого участка струи не зависит от радиуса

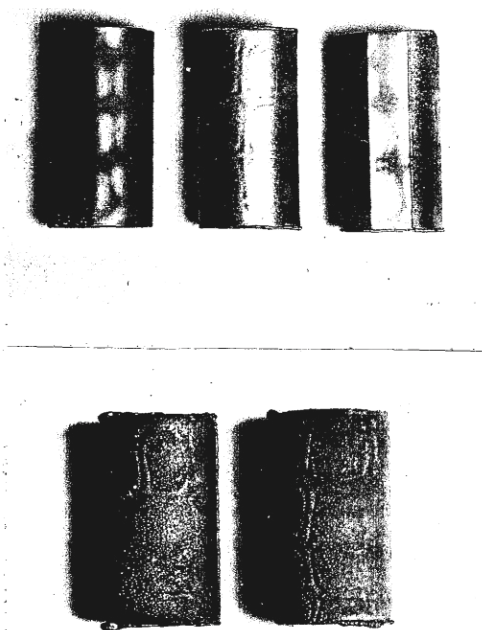


Рис. 2. Формы рельефности хромовых покрытий

кий режим в рабочей зоне, рекомендуется вводить электролит через множество мелких отверстий диаметром 0,5–1,0 мм, часто расположенных по всей рабочей площади анода. При недостаточной частоте отверстий может возникнуть опасность появления застойных зон.

Согласно теории диффузионной кинетики и теплопередачи процессы передачи вещества и тепла подобны [6; 9]. Поэтому все теоретические и экспериментальные результаты, полученные при исследовании процессов теплопередачи, могут быть непосредственно применены к процессам диффузии и наоборот. Из работ [1; 9; 10, р. 95–99], посвященных вопросу теплопередачи струй при их взаимодействии с преградами, следует, что механизм переноса количества теплоты в пограничном слое окрестности критической точки на пластине при натекании на нее турбулентной струи освещен недостаточно. Ю. Н. Юдаев [9] сообщает, что при турбулентном режиме течения пограничного слоя у стенки происходят перемежающиеся выбросы дискретных жидких элементов в область с боль-

шими скоростями. Жидкие элементы, выброшенные из области низких скоростей, турбулируют всю пристенную область. Поэтому явление выбросов интенсифицирует теплопередачу, следовательно, и процессы массообмена, что следует из исследования Рао и Трасса [10]. Основываясь на этих данных, можно полагать, что наличие в пристенной области при взаимодействии затопленных струй с преградой дискретных выбросов отличает способ струйной подачи электролита на поверхность детали от случая продольного обтекания электролитом катода.

Геометрические характеристики и свойства свободных затопленных струй (угол расширения, изменение радиуса и площади поперечного сечения, расход и скорость истечения жидкости и т. д.) подробно изучены и описаны в литературе [1]. Установлено, что если формы отверстия, создающие струи, подобны, то струи также оказываются подобны. Геометрические характеристики и закономерности изменения круглой струи даются в относительных величинах в зависимости от параметра  $\alpha \cdot L/d_0$ , где  $\alpha$  — коэффициент, характеризующий турбулентность струи (коэффициент структуры струи); для круглой струи, где длина сопла (отверстия)  $l = 3 \div 4d_0$ ,  $\alpha = 0,08$ ;  $L/d_0$  — относительное расстояние по оси струи в калибрах (долях диаметра сопла), где  $L$  — диаметр выходного сечения струи до преграды (межэлектродное расстояние от анода до катода). Структура осесимметричной затопленной струи во взаимодействии с экраном представлена на рис. 1.

Результаты исследований процессов тепломассообмена в окрестности критической точки при натекании осесимметричных струй [6; 9; 10] позволяют выделить определяющие параметры интенсивности тепломассообменных процессов. Число Нуссельта  $Nu_0$  для  $\gamma$  зависит от безразмерной координаты вдоль струи  $L/d_0$ , числа  $Re$  и безразмерной скорости струи  $u/u_0$ , а также от кинематической вязкости жидкости и ее температуры. Установлено [9; 10], что максимальный тепломассообмен наблюдается на пластине в зоне торможения при натекании струи при значении  $L/d_0 = 6 \div 7$  для случая осесимметричной круглой струи.

Результаты анализа теории турбулентных струй и исследований в области тепломассообмена позволяют выделить определяющие конструктивно-гидродинамические параметры процесса анодно-струйного хромирования. К конструктивным параметрам следует отнести: диаметр струи в устье сопла  $d_0$ , форму струи в устье (круг, щель и т. д.), относительное расстояние плоскости катода от выходной кромки сопла  $L/d_0$ , относительный шаг отверстий перфорации анода  $s/d_0$ .



К гидродинамическим параметрам можно отнести: число Рейнольдса  $Re$  по сечению отверстия, коэффициент структуры струи  $\alpha$ , объемную скорость электролита в межэлектродном зазоре.

Характер расположения мертвых зон при взаимодействии затопленных струй и их распространения в межэлектродном зазоре определяют параметры:  $L/d_0$ ,  $s/d_0$ ,  $Re$ . При решении вопроса о пригодности того или иного технологического приема электролитического хромирования для практических целей основными показателями являются: производительность процесса (скорость осаждения хрома и выход по току); качество осадков хрома; равномерность распределения хрома на поверхности детали, минимальное влияние на прочностные характеристики основного металла и физико-механические характеристики покрытия (сцепляемость хромового покрытия с основным металлом, микротвердость, износостойкость).

Качество распределения хрома на катоде следует считать определяющим. Режимы хромирования, обеспечивающие высокую скорость осаждения, но дающие некачественные осадки хрома, являются непригодными для применения.

Цель настоящего исследования — установить значения конструктивных и гидродинамических параметров анодно-струйного устройства, обеспечивающих получение стабильных по качеству осадков хрома.

Исследования были выполнены на лабораторной установке анодно-струйного хромирования [3].

Внешний вид и распределение хрома на поверхности катода исследовались в зависимости от следующих параметров: диаметра струи в устье отверстия  $d_0$ ; относительного шага между отверстиями  $s/d_0$ ; относительного межэлектродного зазора  $L/d_0$ ; критерия Рейнольдса  $Re$ ; удельного расхода электролита  $Q$ . При этом использовались цилиндрические аноды с перфорацией круглой формы, относительной длиной  $l = (3 \div 4)d_0$  и коэффициентом структуры  $\alpha = 0,082$  [6]. Число Рейнольдса определялось расходом электролита и диаметром отверстия. Расчет выполнялся по формуле

$$Re = \frac{1,27 \cdot Q}{d_0 \cdot n \cdot \nu},$$

где  $Re$  — число Рейнольдса;

$Q$  — расход электролита,  $m^3/c$ ;

$d_0$  — диаметр отверстия, м;

$n$  — число отверстий в аноде;

$\nu$  — кинематическая вязкость электролита,  $m^2/c$ .

Коэффициент кинематической вязкости был определен экспериментально для стандартного электролита хромирования универсального типа в диапазоне исследуемых температур от 293 до 353 К методом пикнометра. Расход электролита определялся объемным способом.

Исследование конструктивных и гидродинамических параметров анодно-струйного устройства на макрораспределение хрома выполнялось с использованием цилиндрических образцов диаметром 12,5 мм визуально и записью профилограмм осадков хрома на профилографе-профилометре модели «Калибр 201» при вертикальном увеличении  $\times 1000$  и горизонтальном —  $\times 40$ . Исследования выполнялись при режимах хромирования, соответствующих осаждению переходных осадков от блестящих к серым при плотности тока 4,5; 8,0; 9,0  $kA/m^2$  и температуре 318 и 323 К.

Остальные параметры изменялись в следующих пределах:  $d_0$  — от 0,001 до 0,005 м; межэлектродное расстояние принималось  $L = 0,015$  м;  $L/d_0$  — от 3 до 15;  $S/d_0$  — 3, 5; число отверстий  $n$  — 54, 108, 216, 432; число Рейнольдса  $Re$  от  $3 \cdot 10^2$  до  $10^4$ .

Параллельно с исследованиями анодно-струйного способа хромирования аналогичные показатели качества хромовых покрытий определялись и для стационарной ванны в равных режимных условиях электроосаждения.

Результаты исследования, представленные в форме профилограмм на рис. 3–6, показывают, что анодно-струйный способ хромирования способствует осаждению покрытий с более развитым

макрорельефом, чем стационарная ванна. Увеличение числа Рейнольдса способствует интенсивному росту микродендритов, причем высота и количество их растут. Очевидно, подача электролита в зону электролиза, с одной стороны, снижает газонаполнение межэлектродного промежутка, а с другой — нарушает равновесие газонаполнения прикатодного слоя и способствует его локальной неоднородности, что приводит к перераспределению плотности тока на поверхности катода. Отмечено, что более интенсивно дендриты образуются в зоне торможения струй на поверхности катода. Такое проявление действия струйного истечения электролита обусловлено особенностями гидродинамики затопленных струй [1; 2].

При распространении осесимметричной затопленной струи, когда число Рейнольдса, вычисленное по скорости истечения жидкости из отверстия, меньше критического, наблюдается неразмытый, почти цилиндрический участок. Относительная длина неразмытого участка струи не зависит от радиуса отверстия и является функцией только числа Рейнольдса. Сечение затопленной свободной струи по мере удаления ее от торца отверстия увеличивается. Это вызывается в основном влиянием сил трения, обусловленных молекулярной вязкостью на границе раздела струя–окружающая среда. На этом ламинарном участке масса струи увеличивается незначительно. В нем пока отсутствует турбулентная пульсация скорости, приводящая к образованию турбулентных вихрей и переносу импульса струи в окружающую неподвижную жидкость. Причиной последующего расширения ламинарной струи жидкости при числах Рейнольдса меньше критического является, очевидно, не влияние возмущения ее со стороны неподвижной окружающей среды, а возрастание бесконечно малых возмущений, имеющих в самой струе. По мере увеличения скорости истечения и числа Рейнольдса амплитуды этих возмущений будут возрастать, а устойчивость струи уменьшаться. С ростом числа Рейнольдса длина неразмытого участка быстро уменьшается и при  $Re > 2320$  неразмытый участок отсутствует.

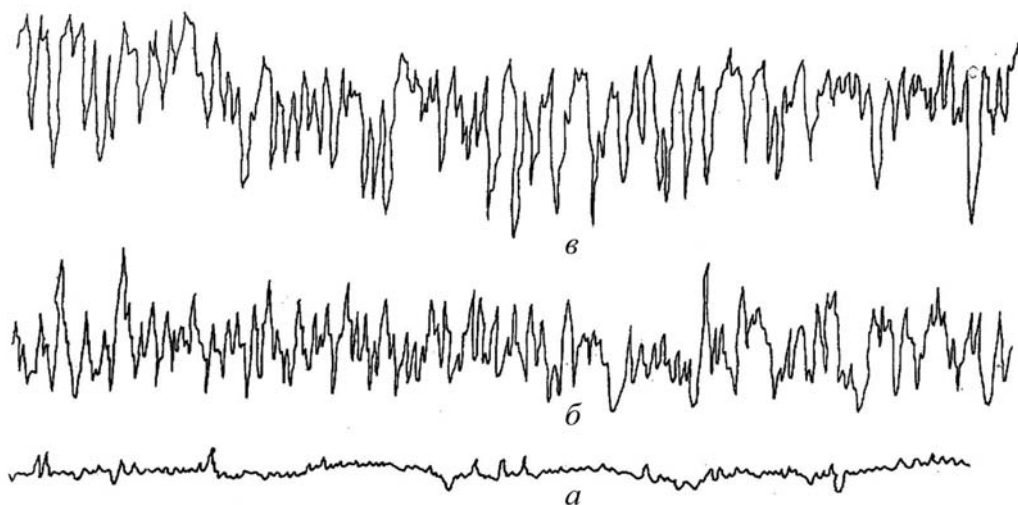


Рис. 3. Равномерность распределения хрома, электроосажденного при температуре 318 К и плотности тока  $4,5 \text{ кА/м}^2$  в стационарной ванне анодно-струйным способом при различной интенсивности движения электролита:

*а* — стационарная ванна; *б* и *в* — анодно-струйный способ соответственно при числе Рейнольдса  $Re = 6 \cdot 10^3$  и  $Re = 10^4$ ;  $L/d_0 = 3,75$ ;  $d_0 = 4 \text{ мм}$

При распространении затопленных струй в межэлектродном пространстве анодно-струйного устройства они ограничены в своем распространении плоскостью катода. При малых скоростях истечения электролита (при  $Re < 2320$ ) струи ламинарные. Неразмытый цилиндрический участок струи достигает поверхности катода и верно растекается на нем. Электролит в ядре струй не содержит газообразный водород и имеет более низкое электрическое сопротивление, чем окружа-

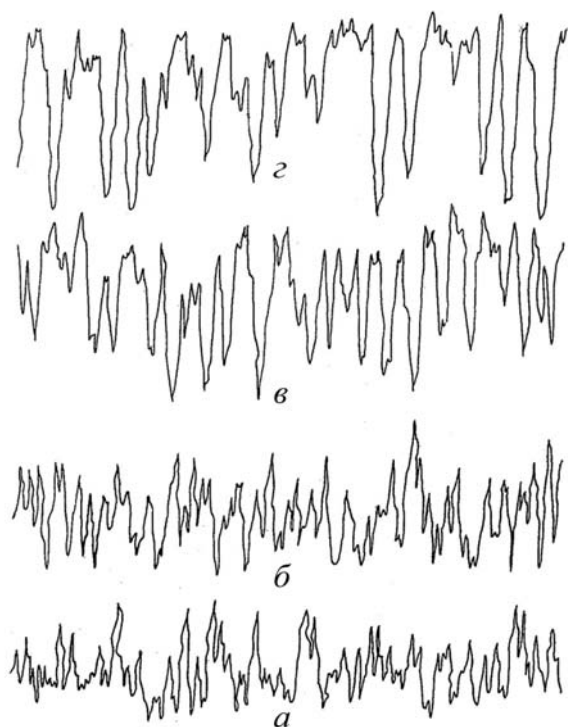


Рис. 4. Равномерность распределения хрома на поверхности основного металла, электроосажденного при плотности тока  $9 \text{ кА/м}^2$  и температуре электролита  $323 \text{ К}$  анодно-струйным способом при  $L/d_0 = 3,75$  в зависимости от числа Рейнольдса:  $a — Re = 1,4 \cdot 10^3$ ;  $б — Re = 2,4 \cdot 10^3$ ;  $в — Re = 3,3 \cdot 10^3$ ;  $г — Re = 6,2 \cdot 10^3$  (профилограммы уменьшены в 2 раза)

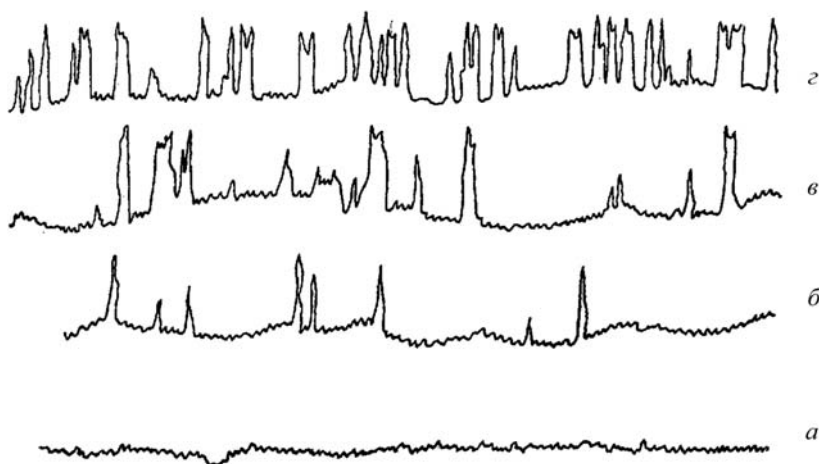


Рис. 5. Распределение хрома на поверхности основного металла, электроосажденного при плотности тока  $9 \text{ кА/м}^2$ , температуре  $323 \text{ К}$ ,  $d_0 = 0,002 \text{ м}$ ;  $L/d_0 = 7,5$ ;  $S/d_0 = 5$  анодно-струйным способом в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ :  $a —$  стационарная ванна;  $б-г —$  анодно-струйный способ: соответственно  $Re = 0,6 \cdot 10^3$ ;  $Re = 2,5 \cdot 10^3$ ;  $Re = 10^4$  (профилограммы уменьшены в 2,5 раза)

ющий их раствор. Поэтому в зоне торможения участок катода имеет более высокую плотность тока. Турбулизация струи имеет место только в зоне торможения. При этом в зоне торможения в результате интенсивного массообмена происходит нарушение сплошности прикатодного слоя и интенсивное удаление молизованных ионов водорода. Очевидно также, что струя электролита также оказывает динамическое влияние на диффузионные процессы в прикатодной пленке. Пузырьки водорода, создавая газообразную оболочку вокруг катода, являются своеобразным регулятором распределения плотности тока на макро- и на микроповерхности катода.

В зоне стыковки веерных струй на поверхности катода создаются мертвые зоны, заполненные водородом, что и способствует образованию рельефности, представленной на рис. 2.

Увеличение скорости истечения струй способствует расширению диаметра неразмытого участка струи. Угол расширения струи при  $500 < Re > 10\ 000$  практически остается постоянным и составляет в среднем  $\alpha = 0,46 \div 0,50$  рад [2]. Турбулизация струи нарушает сплошность газожидкостной оболочки катода на большей площади катода, что, с одной стороны, увеличивает плотность тока в целом, а с другой стороны, выравнивает сопротивление электролита в межэлектродном пространстве. Более равномерное динамическое воздействие струй на поверхность катода приводит к увеличению количества интенсивно растущих микросфероидов хрома.

Рельефность осадков хрома определяется взаимодействием струй на плоскости катода. Выравнивание общего профиля скоростей отдельных струй на поверхности катода способствует более равномерному динамическому воздействию струй на кинетику осаждения хрома. При этом необходимо обеспечить, чтобы поверхность катода находилась в зоне основного участка струй, то есть в зоне полностью турбулизованного сечения струй. Начальный участок с постоянным профилем скоростей не должен достигать поверхности катода. Поэтому необходимо обеспечивать турбулентный режим истечения струй при числе Рейнольдса выше критического значения.

В наших исследованиях за определяющие были приняты безразмерные параметры: относительный шаг отверстий перфорации анода  $S_0/d_0$  (отношение расстояния между осями отверстий к их диаметру) и безразмерное относительное межэлектродное расстояние  $L/d_0$  (отношение межэлектродного расстояния к диаметру отверстия перфорации).

На рис. 6 и 7 представлены профилограммы поверхности осадков хрома, электроосажденных при различных параметрах  $S_0/d_0$  и  $L/d_0$ .

Как следует из рис. 6, при межэлектродном зазоре  $L = 0,015$  м уменьшение диаметра отверстия благоприятствует макрораспределению металла. Лучшие результаты были получены при  $L/d_0 = 15$ . Однако из условия обеспечения максимального массотеплообмена целесообразно принимать этот параметр равным  $7 \div 10$  [9; 10]. Поэтому исследования влияния параметра  $S_0/d_0$  на локальное распределение хрома выполняли, приняв параметр равным 7,5 при диаметре отверстия, равном 0,002 м.

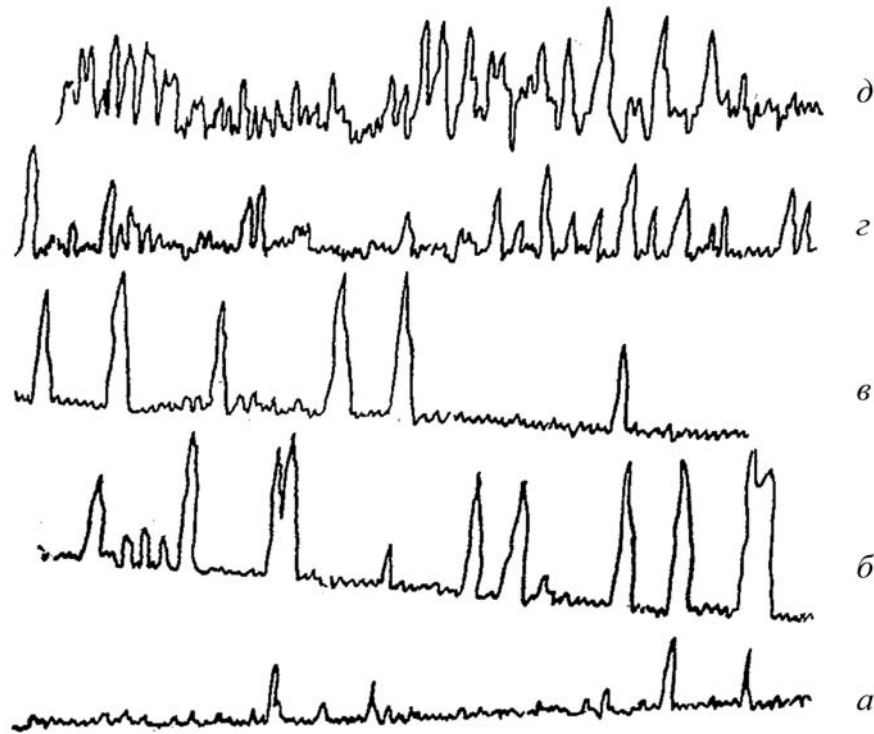


Рис. 6. Распределение хрома на поверхности основного металла, осажденного при плотности тока  $8 \text{ кА/м}^2$  и температуре электролита  $323 \text{ К}$  при  $S_0/d_0 = 4$ ;  $Re = 4 \cdot 10^3$ ;  $L = 0,015$  м способом анодно-струйного хромирования в зависимости от параметра  $L/d_0$ : а — 15; б — 8,75; в — 7,5; г — 5; д — 3,75 соответственно (профилограммы уменьшены в 2,5 раза)



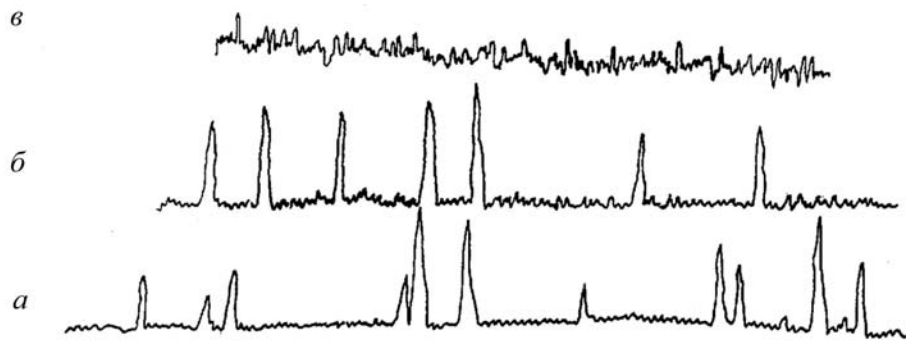


Рис. 7. Распределение хрома на поверхности основного металла, электроосажденного при плотности тока  $8 \text{ кА/м}^2$  и температуре электролита  $323 \text{ К}$  при  $d_0 = 0,002 \text{ м}^2$ ;  $L/d_0 = 7,5$ ;  $Re = 2,5 \cdot 10^3$  анодно-струйным способом в зависимости от значения параметра  $S_0/d_0$ :  
 а — 5; б — 4; в — 3 соответственно

Как следует из рис. 7 уменьшение параметра  $S_0/d_0$  от 5 до 3 обеспечивает выравнивание макрораспределения хрома на катоде, но ухудшает микрораспределение. Таким образом, для обеспечения высокого качества электроосаждения хромовых покрытий анодно-струйным способом необходимо обеспечивать турбулентный режим истечения затопленных струй при принятии числа Рейнольдса не ниже критического, а параметры  $S_0/d_0$  и  $L/d_0$  принимать равными соответственно 3,0 и 7,5.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) струйный способ подачи электролита в зону электролиза при высоких плотностях тока в равных условиях электроосаждения способствует осаждению осадков хрома с более высокой шероховатостью поверхности катода, чем это имеет место в стационарной ванне;

2) изменение макро- и микрораспределения осадков хрома на поверхности катода обусловлено неоднородностью распределения тока из-за неравномерности гидродинамического режима истечения электролита в виде затопленных ограниченных струй в межэлектродном промежутке и образования застойных зон при встречном движении натекающих на катод струй. Локальная неоднородность распределения хрома на катоде определяется изменением параметров  $Re$ ,  $L/d_0$ ,  $S_0/d_0$ ;

3) качественные хромовые осадки из условия получения макро- и микрораспределения хрома на поверхности катода следует получать при следующих значениях определяющих параметров:  $Re > 2320$ ;  $S_0/d_0 = 3$ ,  $L/d_0 = 7 \div 10$ ;

4) рекомендации даны для стандартного универсального хромосульфатного электролита.

### Список литературы

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. — М.: Физмашгиз, 1960. — 715 с.
2. Ашихмин В. И. О некоторых особенностях распространения затопленных струй при невысоких числах Рейнольдса / В. И. Ашихмин // Нефть и газ. — М.: ИВУЗ, 1967. — № 6 (80).
3. Голицын В. А. Восстановление и упрочнение деталей анодно-струйным хромированием при ремонте дизелей судов внутреннего плавания: автореф дис. ... канд. техн. наук / В. А. Голицын. — Л.: ЛИВТ, 1985. — 240 с.

4. Каданер Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. — Харьков: Харьк. ун-т, 1960. — 474 с.
5. Мороз И. И. Электрохимическая обработка металлов / И. И. Мороз [и др.]. — М.: Машиностроение, 1969. — 208 с.
6. Повх И. Л. Техническая гидродинамика / И. Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1969. — 524 с.
7. Шлугер М. А. Ускорение и усовершенствование хромирования деталей машин / М. А. Шлугер. — М.: Машгиз, 1961. — 140 с.
8. Фаличева А. И. Исследование процесса хромирования из электролитов, содержащих соединения хрома (III) и хрома (VI): автореф. дис. ... д-ра хим. наук / А. И. Фаличева. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1971. — 48 с.
9. Юдаев Б. Н. Теплопередача / Б. Н. Юдаев. — М.: Высш. шк., 1981. — 319 с.
10. Rao V. V. Mass Transfer from a flat surface to an Impinging Turbulent Jet / V. V. Rao, O. V. Trass // The Canadian Journal of Chemical Engineering. — 1964. — Vol. 42, № 3.

УДК 621.89:62.2

**Ю. Н. Цветков,**  
д-р техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**А. А. Татулян,**  
ООО «ВМПАВТО» (Санкт-Петербург)

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ВЫСОКОДИСПЕРНЫХ ПОРОШКОВ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СМАЗКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

### INFLUENCE OF SUPERFINE SOLID LUBRICANTS IN GREASE ON THE PERFORMANCE OF ROLLING BEARINGS

*Разработана методика ускоренных испытаний пластичных смазочных материалов в подшипниках качения. Испытания проводили на шариковых сферических подшипниках 1203 при частоте вращения внутреннего кольца подшипника, равной 6000 об/мин, и нагрузке на подшипник, равной 2450 Н. Испытывали смазочные композиции на основе Литол-24 с добавками высокодисперсных порошков дисульфида молибдена, графита и цинка. Показано, что трение в подшипниках качения нечувствительно к наличию в смазке Литол-24 высокодисперсных порошковых добавок твердых смазочных материалов и мягких металлов. При этом добавка в смазку высокодисперсных порошков ведет к незначительному увеличению скорости изнашивания подшипников и, как следствие, снижению их долговечности, но при этом снижается разброс значений долговечности. Дополнительная добавка в Литол-24, содержащий высокодисперсные порошки твердых смазочных материалов, присадок на основе диалкилдитиофосфатов Zn, ведет к дальнейшему снижению долговечности подшипников, но скорость их изнашивания существенно снижается по сравнению с подшипниками, смазываемыми Литолом-24 без добавок.*

*An experimental procedure was developed for accelerated testing a grease in ball bearings 1203. The experimental conditions were as follows. The rotational speed of the bearing inner race was equal to 6000 rpm, and the load – 2450 N. The tested greases were lithium soap grease (Litol-24) without any additives and Litol-24 doped with superfine solid lubricants such as molybdenum disulphide, graphite and zinc. It was shown that rolling friction is insensitive to the presence of solid lubricant superfine powder in grease. At the same time the addition of solid lubricant powder in Litol-24 leads to an increase in the ball bearing wear and, as a consequence, to diminishing the bearing life; but the scatter in bearing life diminishes, in other words, the results become more predictable. The*