УДК 621.757
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВАННЫ ХРОМИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА

А.Н. Котомчин
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *В процессе хромирования деталей автомобилей происходит изменение состава ванны хромирования, что влияет на стабильность протекающих процессов – производительность и качество хромового покрытия. Поэтому требуется постоянный контроль ванны хромирования на наличие посторонних элементов, которые могут образоваться в процессе работы ванны при реакции раствора с анодом или катодом.*
Материалы и методы. *При проведении исследований применялось необходимое оборудование, позволившее с достаточной точностью определять содержание трёхвалентного хрома и влияние его на процесс электролиза – производительность и качество хромовых покрытий. Для определения качества и производительности использовалась известная методика.*
Результаты. *При проведении исследований полученного холодного саморегулирующегося электролита хромирования было установлено, что существенное влияние на стабильность работы ванны хромирования оказывает трёхвалентный хром – содержание, которое при работе может меняться в пределах 2…25 г/л. В результате выяснили, что оптимальным количеством трёхвалентного хрома является содержание его в ванне хромирования от 2 до 15 г/л. При меньшем или большем содержании происходит снижение производительности электролиза и качества хромового покрытия. Также было установлено, что для поддержания оптимального количества трёхвалентного хрома и увеличения времени для стабильной работы хромовой ванны необходимо соблюдение отношения площади анода и катода (покрываемой поверхности детали), значение которого находится в пределах 3...4.*
Обсуждение и заключение. *В результате проведенных исследований даст возможность при выполнении определённых условий, проведения процесса осаждения хрома из холодного саморегулирующего электролита позволит стабильно проводить осаждение хрома при высокой производительности и необходимым качеством получаемых покрытий. Главное условие сохранения долговечности и стабильности ванны хромирования – контроль и поддержание количества трёхвалентного хрома в электролите хромирования в ванне.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *хромирование, долговечность, стабильность, трёхвалентный хром, анод, катод, количество электричества, рассеивающая способность.*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Благодарность рецензентам статьи.*

Поступила 05.07.21, принята к публикации 31.08.21.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Котомчин, А.Н. Оптимизация работы ванны хромирования при восстановлении деталей автотранспорта / А.Н. Котомчин. – DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-18-4-390-405 // *Вестник СибАДИ.* – 2021. – Т. 18, No 4(80). – С. 390-405.

© Котомчин А.Н., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405

OPTIMIZATION OF THE CHROME PLATING BATH OPERATION DURING THE RESTORATION OF VEHICLE PARTS

Aleksei N. Kotomchin
Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. *In the process of chrome plating of car parts, there is a change in the composition of the chrome plating bath, which affects the stability of the ongoing processes – the performance and quality of the chrome coating. Therefore, it is necessary to constantly monitor the chrome plating bath for the presence of foreign elements that can be formed during the operation of the bath during the reaction of the solution with the anode or cathode.*
Materials and methods. *During the research, the necessary equipment was used, which made it possible to determine with sufficient accuracy the content of trivalent chromium and its effect on the electrolysis process – the performance and quality of chrome coatings. A well-known technique was used to determine the quality and performance.*
Results. *When conducting studies of the obtained cold self-regulating chromium plating electrolyte, it was found that trivalent chromium has a significant effect on the stability of the chromium plating bath. The content of which can vary within 2...25 g/l during operation. As a result, it was found that the optimal amount of trivalent chromium is its content in the chromium plating bath from 2 to 15 g/l. With a lower or higher content, the electrolysis performance and the quality of the chrome coating decrease. It was also found that in order to maintain the optimal amount of trivalent chromium and increase the time for stable operation of the chromium bath, it is necessary to observe the ratio of the area of the anode and cathode (the coated surface of the part), the value of which is within 3...4.*
Discussion and conclusion. *As a result of the conducted research, it will make it possible, under certain conditions, to carry out the process of chromium deposition from a cold self-regulating electrolyte, which will allow for stable chromium deposition at high productivity and the necessary quality of the coatings obtained. The main condition is to control and maintain the amount of trivalent chromium in the chromium plating electrolyte in the bath.*

KEYWORDS: *Chrome plating, durability, stability, trivalent chromium, anode, cathode, amount of electricity, scattering capacity.*

GRATITUDES. *Thanks to the reviewers of the article.*

Submitted 05.07.21, revised 31.08.21.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Kotomchin A.N. Optimization of the chrome plating bath operation during the restoration of vehicle parts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (4): 390-405. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405.

© Kotomchin A.N., 2021

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс электролитического хромирования имеет ряд особенностей, отличающих его от других гальванических процессов.

К числу этих особенностей относится применение нерастворимых анодов и высоких плотностей тока. Хромовые электролиты отличаются сравнительно более низким выходом по току и плохой рассеивающей способностью.

Наиболее распространенным электролитом хромирования является универсальный, который используют для получения износостойких блестящих покрытий толщиной до 0,25 мм.

С целью увеличения толщины покрытия с требуемым качеством покрытий учёными были проведены исследования для получения более производительных электролитов, которые бы позволили увеличить предельную толщину покрытий до 0,7…1 мм с наименьшими затратами времени и труда [1]. Было выявлено, что одним из перспективных электролитов хромирования является холодный, саморегулирующийся электролит хромирования, обладающий рядом преимуществ: это высокая производительность, рассеивающая способность при получении бестрещиноватых осадков с высокой износостойкостью и твёрдостью. Однако в процессе работы возникала необходимость контроля и корректировки содержания в растворе различных элементов, которые влияют на стабильность проведения процесса хромирования.

Для правильной работы электролитов хромирования требуется его постоянный анализ и корректировка для получения необходимого качества покрытия с заявленной производительностью и рассеивающей способностью.

Плохая рассеивающая способность хромового электролита, наряду с низким выходом по току и небольшой величиной электрохимического эквивалента хрома, приводит к тому, что глубокие участки рельефных изделий часто вовсе не покрываются хромом. Кроме того, в результате местной концентрации силовых линий на торцах изделия, подвергающегося хромированию, обычно образуются наросты хрома (диндриты). При хромировании внутренней поверхности цилиндров и наружной поверхности валов, при неправильном положении катодов относительно хромируемой поверхности может образоваться различной толщины покрытие с эллипсом или конусом, устранение которых может быть затруднительно [2, 3].

Известно, что при использовании универсального электролита хромирования для нормальной работы хромового электролита, кроме содержания в нем хромового ангидрида – шестивалентного хрома (CrO_3) и серной кислоты ($H_{2S}O_4$), необходимо также содержание небольшого количества трехвалентного хрома (Cr^{3+}). Последний при составлении электролита не вводится, учитывая, что он быстро накапливается в процессе работы ванны в результате восстановления шестивалентного хрома на катоде. Поэтому хромовый электролит после приготовления требует проработки током для накопления ионов трехвалентного хрома. Для проработки электролит нагревается до t=45–50°, на катодную штангу завешивается максимальное количество плоских свинцовых анодов, а на анодную штангу в 3–4 раза меньше (по площади). После этого включают ток при напряжении U=6–8 вольт. При этом катодная плотность тока в несколько раз меньше анодной (из-за отношения анодной и катодной поверхности). Процесс восстановления на катоде идет интенсивнее процесса окисления на аноде, так как при повышенной плотности тока на аноде имеет место газообразное выделение кислорода и только в незначительной степени идет процесс обратного окисления образовавшегося на катоде трехвалентного хрома [4].

Процесс проработки нормально продолжается 5–6 ч, после чего аналитически проверяют содержание в электролите трехвалентного хрома (Cr_2O_3), которое должно быть и пределах 1–2% от хромового ангидрида. При получении удовлетворительных результатов анализа производят пробное хромирование. Переходить к рабочему хромированию можно только после того, как будут получены светлые блестящие осадки. Внешне конец проработки ванны током определяется по интенсивному и равномерному выделению пузырьков газа на аноде.

Однако неравномерное выделение газа, толчками, сопровождаемое колебаниями стрелки амперметра и уменьшением силы тока, при одновременном увеличении напряжения по вольтметру свидетельствует об избытке в электролите Cr^{3+}, поэтому для поддержания долговечности и стабильности работы ванны хромирования возникает необходимость определения закономерности накопления Cr^{3+} и влияние его на процесс электролиза в целом.

ТЕОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований было установлено, что при повышенном содержании трехвалентного хрома увеличивается сопро-

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

тивление электролита и падает плотность тока. В результате суживается интервал плотностей тока, при котором получаются блестящие осадки, а также иногда образуются темные осадки, подобные получаемым при недостатке SO_4 в электролите [5].

Контроль содержания трехвалентного хрома лучше производить два раза в месяц и, кроме того, систематическим наблюдением за характером выделения газов на катоде, которое должно быть интенсивным и равномерным. Характерным признаком избытка трехвалентного хрома является выделение газа на катоде толчками.

Уменьшение содержания трехвалентного хрома в электролите производилось аналогичной проработкой с той разницей, что площадь анодов берется максимальной, а площадь катодов минимальной. В этом случае анодная плотность тока будет в несколько раз меньше катодной и процесс окисления трехвалентного хрома в шестивалентный на аноде пойдет интенсивнее катодного восстановления шестивалентного хрома в трехвалентный. Так, на катоде при повышенной плотности тока будет иметь место газообразное выделение водорода и только в незначительной степени образование трехвалентного хрома. В процессе работы хромовой ванны она периодически подвергается проработке для установления нормального содержания в электролите хромирования трехвалентного хрома в пределах 2…10 г/л.

В связи с применением нерастворимых анодов, а также вследствие уноса электролита изделиями и выделяющимися газами хромовый электролит быстро обедняется содержанием хромового ангидрида.

При использовании холодного саморегулирующегося электролита хромирования возникает одна из проблем, которая значительно влияет на рассеивающую способность электролита и тем самым на производительность и качество покрытий. Необходимо рассмотреть, какое влияние оказывает Cr^{3+} при различных его концентрациях (г/л) на рассеивающую способность исследуемого электролита.

Согласно данным многих учёных (Н.И. Корнейчук, Ю.Н. Петров, М.А. Шлугер) был выделен холодный саморегулирующийся электролит, который обладает рядом преимуществ – высокая производительность и получение хромовых осадков с хорошими физико-механическими свойствами. Для сохранения хороших качеств данного электролита были проведены исследования и разработан новый состав холодного саморегулирующегося электролита, позволившего увеличить диапазон рабочих температур в диапазоне 18…35° С при плотности тока 75…200 А/дм^2. Это обеспечивает повышение производительности процесса и качества осадков хрома, при котором выход металла по току составляет 47,5…50%, микротвердость покрытий во всём интервале плотностей тока достигает 8500…11500 Мпа с одновременным повышением их износостойкости [6].

Таким образом, по сравнению со стандартным электролитом хромирования (выход металла по току – 15…17%, плотность тока 40…70 А/дм^2) при сопоставимых энергозатратах на нагрев горячего электролита и охлаждение холодного саморегулирующегося электролита и сопоставимых физико-механических свойств покрытий предложенный способ хромирования обеспечивает снижение энергозатрат на единицу толщины покрытия не менее чем в 2 раза. А если учесть возможность получения качественных покрытий хрома в холодном саморегулирующемся электролите толщиной до 0,5…0,7 мм, за 2 часа работы электролитической ванны по сравнению с ваннами горячего типа, где максимальная толщина хрома составляет 0,3 мм и достигается за 8…10 ч работы, то преимущества холодного электролита хромирования становятся ещё весомее [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14].

Поэтому одновременно возникла необходимость сравнительной оценки рассеивающей способности холодного саморегулирующегося электролита хромирования, описанного ранее, а также влияния плотности тока и времени хромирования на эту способность электролита.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения исследования стабильности высокопроизводительного электролита в качестве объекта исследований был взят холодный саморегулирующийся электролит хромирования (ХСЭХ), использование которого требует поддержание рабочей температуры электролита в пределах 18…35° С.

Площадь покрываемой детали (катода) равна $S_к$=0,1дм^2 – образцы диаметром 12 мм, длиной 26,5 мм.

Состав исследуемого электролита следующий: хромовый ангидрид (CrO_3) 420…450 г/л, сульфат кобальта ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$) 10 г/л, сульфат никеля ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$) 10 г/л, плавиковая кислота (HF) 0…1г/л. Плотность тока 75–200А/дм^2. Выход по току до 50%, микротвёрдость до 11500 МПа. Объём приготовляемого электролита – 8 л.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

При приготовлении электролита соблюдалась определённая последовательность и требования. Очищенную и высушенную ванну с известным объемом заполнили на 2/3 объема дистиллированной водой. Затем небольшими порциями засыпалась навеска расчётного количества хромового ангидрида, необходимого для получения заданной концентрации хромовой кислоты. После растворения хромового ангидрида осторожно, мелкими порциями, в ванну присыпался углекислый кальций, чтобы температура раствора в ванне не превышала 40° С. Для добавления сульфата никеля и кобальта их предварительно растворяли в отдельном сосуде с дистиллированной водой в необходимом количестве, заливая в ванну, тщательно перемешивая с содержимым. Затем измерялась с помощью ареометра плотность раствора, при температуре 20° С, и прибавлением в ванну дистиллированной воды доводили её до оптимального значения.

Используемое необходимое оборудование: ванна хромирования ОГ-1349А; источник эл. тока ВАКГ-1600, ванна для промывки 70-7888-1100 ГОСНИТИ.

Аноды изготавливались из сплава свинца, сурьмы и олова при следующем соотношении: 92–95% свинца, 0,5% сурьмы и 5–8% олова. Этот состав анода необходим для исключения образования на поверхности анодов трудно растворимых оксидов свинца и фторида кальция, которые могут увеличить электрическое сопротивление и тем самым расход электроэнергии.

Для дальнейшего использования электролита нужно, чтобы он стабилизировался до 8 ч для нормализации его температуры и выпадения в осадок сульфата кальция (образование донной фазы). Затем в течение 6–10 ч была необходимость проработки электролита с целью образования необходимого количества трёхвалентного хрома в количестве не менее 2…15 г/л для обеспечения устойчивой работы электролита.

Для достоверности исследований и исключения влияния температуры использовалась установка для поддержания рабочей температуры в интервале температур от 18…35° С [15].

Качество покрытий оценивали по состоянию морфологии и величине микротвёрдости покрытия с помощью микроскопа МИМ-8М с цифровой приставкой и микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 1Н.

Образцы, просушенные в сушильном шкафу, подготовленные для исследований определения выхода хрома по току, взвешивались на весах 1-го класса точности АДВ-200.

Толщина покрытия измерялась микрометром МК 0-25 по ГОСТ 6507–90.

Содержание Cr (III) определяли по разности между количеством общего хрома и шестивалентного:

$$C_{Cr\,(III)} = C_{Cr\,общ} - C_{Cr\,(VI)}, \text{ г/л}, \quad (1)$$

где $C_{Cr\,общ}$ – общее количество хрома, г/л;

$C_{Cr\,(VI)}$ – количество шестивалентного хрома, г/л.

Наклон общей прямой отражает интенсивность накопления Cr^{3+} (J), которую можно выразить отношением

$$J = \frac{C}{Q}, \quad (2)$$

где С – концентрация Cr^{3+} в электролите , г/л;

Q – количество электричества, прошедшего через раствор ,А-ч.

$$Q = I \cdot t, \quad (3)$$

где I– сила тока, А;

t – время электролиза, ч;

Применительно к гальваническим процессам:

$$I = Д_к \sum_{i=1}^{n} S_k, \quad (4)$$

где $Д_к$ – катодная плотность тока А/дм²;

$\sum_{i=1}^{n} S_k$ – суммарная площадь катода, дм².

Подставляя значения (4) в выражение (3), получаем

$$Q = Д_к \sum_{i=1}^{n} S_k \cdot t. \quad (5)$$

Окончательное выражение интенсивности накопления трехвалентного хрома в электролите при исследуемом отношении его объема (л) к площади катода (дм²):

$$\frac{V_в}{S_k} = \frac{8}{0.1} = 80.$$

Формулу для расчета рабочего времени исследуемой ванны до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в электролите C_{max} можно представить из выражения (2):

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

$$t_{пр} = \frac{C_{max}}{Д_к \cdot S_к \cdot J_n}, \quad (6)$$

где C_{max} – максимально возможная концентрация трёхвалентного хрома для проведения стабильного электролиза, г/л;

$S_к$ – площадь катода (покрываемой поверхности детали), дм^2.

Для расчета рабочего времени производственной ванны с известным отношением n необходимо учитывать кратность (К) единичного объема раствора в общем (V) всей ванны:

$$K = \frac{V}{V_e}. \quad (7)$$

Общая формула для определения времени работы ванны хромирования в холодном саморегулирующемся электролите до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в растворе имеет вид:

$$T = \frac{C_{max} \cdot V}{Д_к \cdot \sum_{i=1}^{n} S_к \cdot J_n \cdot V_e}, ч. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установлено, что для исследуемого электролита при $Д_к$=75÷200 Адм^2 выход металлического хрома по току почти постоянный (47,5±2,5%).

Для оценки рассеивающей способности электролита в качестве критерия взяли отношение минимального веса хрома, осажденного на части катода, к среднему весу, приходящемуся на одну часть

$$K_Р = M_{мин}/M_{ср.} \quad (9)$$

На рисунке 1 показано изменение $К_Р$ в зависимости от средней плотности тока ($Д_{кср}$) и времени хромирования.

Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Рассеивающая способность холодного электролита хромирования лучше, чем универсального.

2. С увеличением средней плотности тока рассеивающая способность холодного электролита улучшается.

В начальный период хромирования рассеивающая способность холодного электролита изменяется в зависимости от времени хромирования.

Рассеивающая способность системы электрод–электролит определяется многими факторами, такими как концентрация компонентов электролита, продуктов промежуточных электрохимических реакций, природой различных добавок к электролиту и некоторыми другими факторами, сущность которых будет изложена ниже [16,17,18,19].

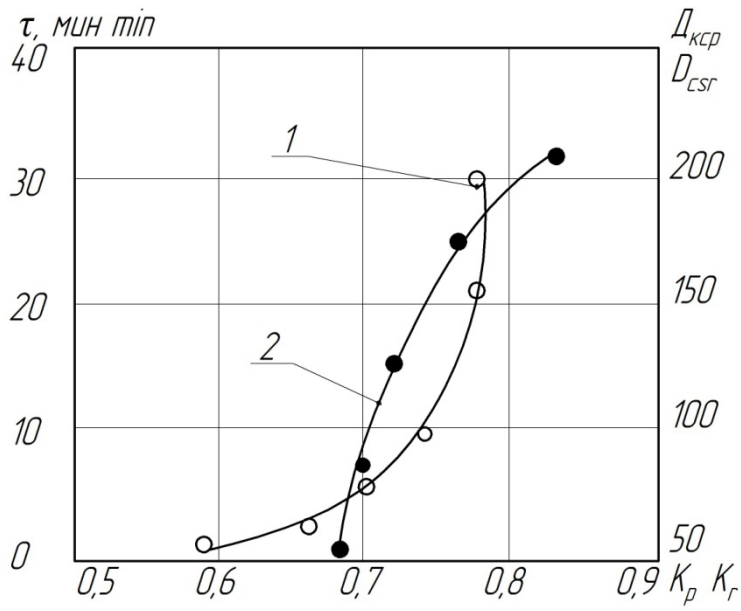


Рисунок 1 – Изменение рассеивающей способности ($К_р$) электролита в зависимости от времени хромирования (t) и средней плотности тока ($Д_{кср}$); 1 – время хромирования; 2 – $Д_{кср}$

Figure 1 – Change in the scattering capacity (Kr) of the electrolyte depending on the chrome plating time (t) and the average current density (Dcsr); 1 – the chrome plating time; 2 – Dcsr

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Опытным путём установлено, что в процессе электроосаждения хрома количественный состав компонентов электролита постепенно меняется. Наиболее быстро происходит изменение концентрации трехвалентного хрома – продукта неполного восстановления хромовой кислоты.

Известно, что повышенная концентрация трехвалентного хрома способствует снижению электропроводности и рассеивающей способности раствора, ухудшению физико-механических свойств осадков. В зависимости от ионного состава электролита оптимальная концентрация в нем Cr^{3+} может колебаться в широком интервале: от нескольких единиц до 20 г/л и выше [20]. В практике хромирования стабильность концентрации Cr^{3+} в растворе поддерживается выбором соответствующего отношения площадей катода и анода[1]. На последнем происходит окислительная реакция $Cr^{3+} \rightarrow Cr^{6+}$.

Результаты лабораторных исследований и опыт промышленного применения высокопроизводительного способа хромирования в холодном саморегулирующемся электролите показали, что рекомендуемое большинством авторов оптимальное отношение площадей анода (S_a) к катоду (S_K) $S_a/S_к$=1,5…2 не обеспечивает стабильности концентрации Cr^{+3} в электролите. В связи с этим возникла необходимость дополнительных исследований.

В исследовательской работе изучались интенсивность накопления трехвалентного хрома в процессе электролиза холодного саморегулирующегося электролита, а также изменение выхода хрома по току и микротвердости осадков.

На основании полученных данных можно произвести расчет рабочего времени ванны хромирования до накопления предельной концентрации трехвалентного хрома в электролите.

Исследованиями также установлено (рисунок 2), что с увеличением ($Д_к$) концентрация Cr^{3+} прямо пропорциональна плотности тока и закономерность носит линейный характер.

Рисунок 2 показывает, что рост концентрации Cr^{+3} в растворе происходит по прямолинейному закону. Наклон прямой отражает интенсивность накопления Cr^{3+} [20].

Данные разработки показали, что при всех исследуемых отношениях $m=S_a/S_к$ как m<1, так и m>1 в процессе электролиза происходит увеличение концентрации трехвалентного хрома в растворе (рисунок 3).

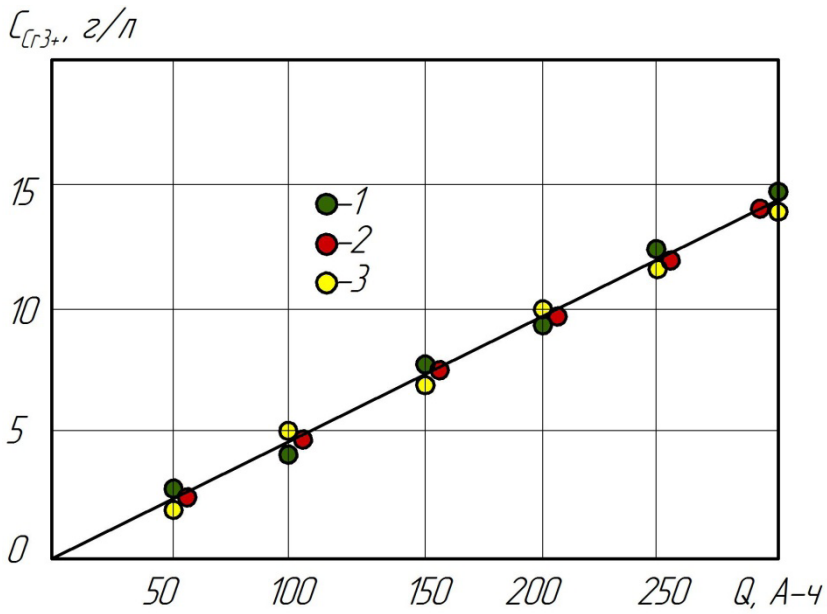


Рисунок 2 – Изменение концентрации трехвалентного хрома (C_{Cr3+}, г/л) в зависимости от количества прошедшего через раствор электричества (Q, А-ч) при отношениях площади анода к площади катода ($S_a/S_к$): 1–2/1; 2–4/1; 3–8/1

Figure 2 – Change in the concentration of trivalent chromium (CCr3+, g/l) depending on the amount of electricity (Q, A-h) passed through the solution at the ratio of the area of the anode and cathode (Sa/SK): 1-2/1; 2-4/1; 3-8/1

[1] Петров Ю.Н. Аномалии процесса хромирования в холодных электролитах/ Ю.Н. Петров, М.П. Стратулат, А.И. Ковбасюк // Труды Кишиневского СХИ. Т. 75 – Кишинев: – 1970. – С. 142–146.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

При отношении m<1 (1/2) высокая анодная плотность тока (200 А/дм^2) обусловливает образование на анодной поверхности плотного слоя перекиси свинца, следствием чего является резкое увеличение напряжения в электрической цепи и снижение катодной плотности тока. При отношении m>1 катодный процесс протекает более устойчиво, с равномерной интенсивностью накопления трехвалентного хрома (рисунок 3, кривая *1*). В пределах концентраций (С=0…15г/л) выход хрома по току и качество покрытий практически одинаковы. При концентрации Cr^{3+} от 9 до 15 г/л наблюдается постепенное снижение выхода хрома по току и увеличение микротвердости осадков (рисунок 3, кривая *2)*. При увеличении концентрации более 15 г/л покрытия темнеют, снижается их микротвердость, по краям образцов появляется порошкообразный рыхлый осадок [21, 22, 23].

Можно заключить, что концентрация Cr^{3+} в растворе около 15 г/л является предельной. Дальнейшая эксплуатация ванны становится нецелесообразной вследствие нарушения нормальных условий электрокристаллизации осадка.

На основании полученных данных нами произведен расчет рабочего времени ванны хромирования до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в разработанном электролите.

При катодной плотности тока 150 А/дм^2 и объёма используемого электролита 2 л интенсивность накопления составит $J_{20}=3{,}0\cdot10^{-2}$ г/л А-ч^2.

При изменении отношения объема электролита к площади катода интенсивность накопления Cr^{3+} будет увеличиваться или уменьшаться по обратной зависимости. Если площадь катода постоянная $S_к$=0,1 дм^2 , то отношение $\frac{V}{S_к}$ можно изменять только за счет объема раствора, который в каждом случае будет единичным (V_e). Обозначив $\frac{V}{S_к}$ через n, интенсивность J_n можно вычислить из пропорции

$$\frac{J_{20}}{J_n}=\frac{n}{20}, \text{ откуда } J_n=\frac{J_{20}\cdot 20}{n}.$$

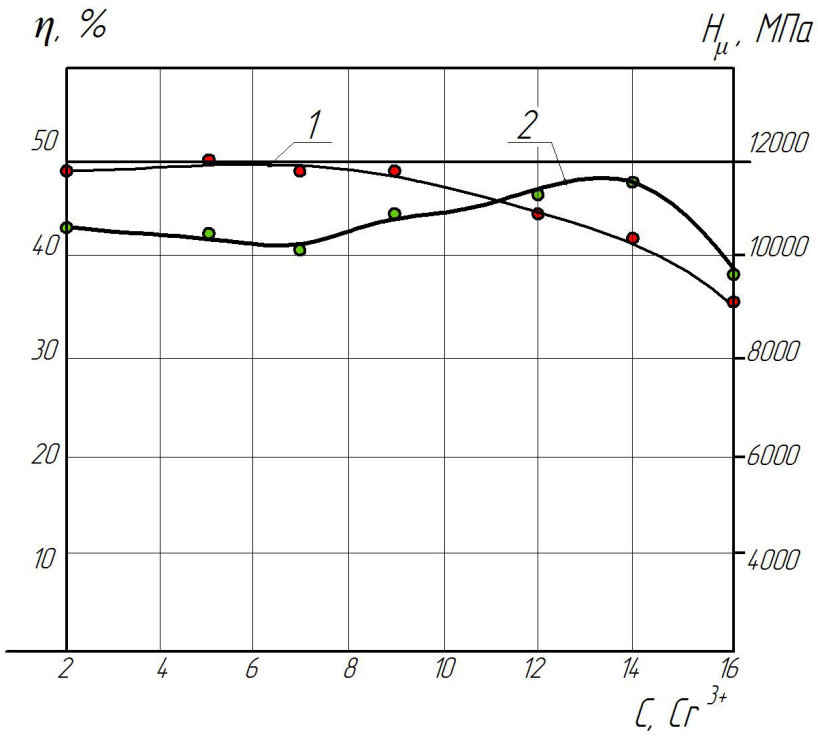


Рисунок 3 – Влияние концентрации трехвалентного хрома (C_{Cr+3}, г/л) в электролите хромирования: 1 – выход металлического хрома по току (η, %), 2 – микротвердость покрытий ($H_μ$, МПа)

Figure 3 – Effect of the concentration of trivalent chromium (C Cr+3, g / l) in the chromium plating electrolyte: 1 – the current output of metallic chromium (η,%), 2 – the microhardness of coatings (Hμ, MPa)

[2] Корнейчук Н.И. Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования / Н.И. Корнейчук, А.И. Ковбасюк, А.В. Лисник // Труды Кишиневского СХИ, т. 144. – Кишинев: 1975. – С. 17–23.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Для стабильного поддержания рабочей температуры электролита хромирования (с целью улучшения теплообмена раствора ванны) использовали соотношение объёма ванны хромирования ($V_в$) к покрываемой площади ($S_к$) $n=V_в/S_к$=80…100 л/дм^2.

Тогда для единичного объема электролита V_e = 8 л.

$$J_{80}=\frac{20\cdot 3\cdot 10^{-2}}{80} = 0{,}75\cdot 10^{-2} \text{ г/л А-ч.}$$

Расчет рабочего времени исследуемой ванны до накопления предельной концентрации Cr^{3+} в электролите C_{max} при $\frac{V_e}{S_к}$ = 80, $Д_к$ = 150 А/дм^2, J_{80} = 0,0075 г/л А-ч и C_{max} = 15 г/л можно рассчитать из выражения (6):

$$t_{80}=\frac{15}{150\cdot 0{,}1\cdot 0{,}0075} = 133{,}3 \text{ ч.}$$

Из рисунка 4 видно, что кривая *1* при отношения объёма электролита к площади покрываемой детали 80 увеличивает работоспособность ванны хромирования, при этом снижение данного значения до 50 ограничивает область продолжительности работы ванны хромирования с нормальными условиями электрокристаллизации осадков при значениях $Д_к$ = 75…200 А/дм^2.

В результате исследований было установлено, что при повышенном содержании трехвалентного хрома увеличивается сопротивление электролита и падает плотность тока. В результате суживается интервал плотностей тока, при котором получаются осадки с необходимой толщиной, качеством и производительностью.

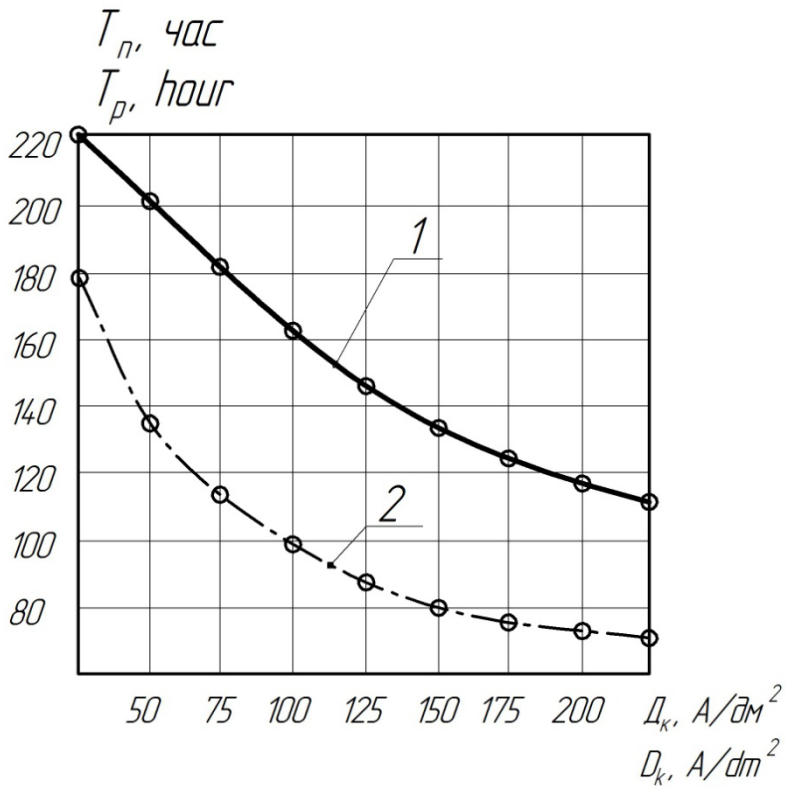
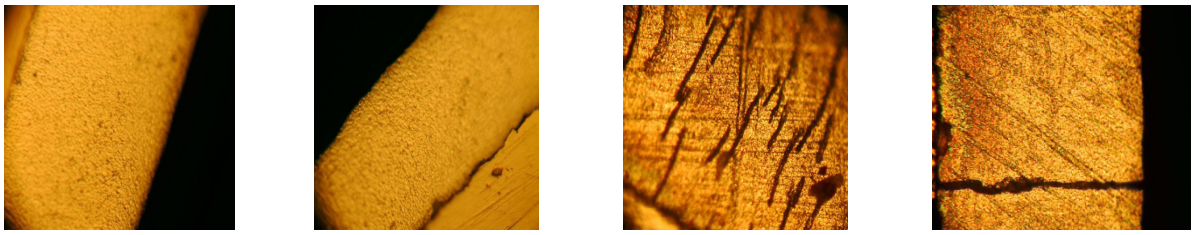


Рисунок 4 – Влияние катодной плотности тока ($Д_к$, А/дм^2) на время накопления предельной концентрации трехвалентного хрома ($T_п$, ч) в зависимости от покрываемой площади детали при значениях отношения объёма ванны хромирования к площади катода ($\frac{V_e}{S_к}$, л/дм^2): 1 – 80, 2 – 50

Figure 4 – Influence of the cathode current density (Dc, A/dm2) on the accumulation time of the maximum concentration of trivalent chromium (Tp, hour) depending on the covered area of the part at the ratio of the volume of the chromium plating bath to the cathode area ($\frac{V_e}{S_к}$, l/dm^2): 1 – 80, 2 – 50

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



а ***б*** (b) ***в*** (c) ***г*** (d)

Рисунок 5 – Микрошлифы хромовых покрытий, полученных при количестве трёхвалентного хрома C_{Cr}^{3+}, г/л: а –2–9, б – 9–15, в – 15–20, г – более 20 г/л

Figure 5 – Microslips of chrome coatings obtained: with the amount of trivalent chromium CCr 3+, g/l: a-2-9, b-9-15, c-15-20, d-more than 20 g/l

Таблица 1
Уровни варьирования факторов

Table 1
Levels of factors variation

Независимые факторы нижний уровень		Натуральное значение/кодированное		
		средний уровень	верхний уровень	
$V_a/S_к$, л/дм^2	X_1	20 (-1)	60 (0)	100 (1)
Q, А-ч	X_2	20 (-1)	160 (0)	300 (1)
$S_a/S_к$	X_3	1 (-1)	3 (0)	5 (1)

После накопления предельной концентрации трехвалентного хрома электролит подвергается специальной проработке на снижение в нем концентрации Cr^{3+} – прорабатывают током при большой поверхности анода и минимальной поверхности катода.

Для оценки качества покрытий были проведены исследования микрошлифов, получаемых хромовых покрытий при различном содержании Cr^{3+}, которые показаны на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно влияние концентрации C_{Cr}^{3+} на качество покрытий, при котором при увеличении концентрации более 15 г/л качество покрытий падает. Так, при увеличении концентрации Cr^{3+} более 15 г/л появляются микротрещины на поверхности, снижается выход по току, а при концентрации более 20 г/л появляются сквозные трещины, которые снижают коррозионную стойкость и контактную прочность, делая нецелесообразным использование данных покрытий при восстановлении деталей автотранспорта.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью анализа полученных результатов и получения математической модели влияния различных независимых факторов, влияющих на накопление Cr^{3+}, была проведена математическая статистическая обработка данных.

С целью обработки данных выбраны наиболее значимые факторы, влияющие на процесс накопления Cr^{3+} – отношение объёма ванны и площади катода ($V_a/S_к$, л/дм^2), количество электричества, прошедшего через раствор (Q, А-ч) и отношение площади анода к катоду ($S_a/S_к$).

Для дальнейшей обработки данных выбраны уровни варьирования факторов, которые показаны в таблице 1, наименьшее значение фактора обозначено «-1», среднее значение «0» и максимальное значение «1» [24].

С целью более достоверной и точной обработки данных был выбран следующий план: 3–1–27, где 3 – количество независимых факторов, 1 – количество зависимых факторов, 27 – количество проведённых опытов. В качестве зависимого фактора взято накопление Cr^{3+}. Получаемые значения по накоплению Cr^{3+} взяты исходя из среднего значения трёх повторяющихся опытов.

Обработку данных и получение математической модели проводили с помощью программы Statistika, в которую включены необходимые формулы и расчёты. В результате обработки данных полученная математическая модель оказалась адекватной и предсказуемой. Полученные данные были с минимальными отклонениями от табличных значений Стьюдента и Фишера [24].

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

***Таблица* 2**
Матрица трехфакторного плана типа 3–1–27

Table 2
Matrix of a 3-factor plan of type 3-1-27

N опыта	$V_в/S_к$, л/дм^2	Q, А-ч	$S_а/S_к$	Количество Cr^{3+}, г/л
1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	6
2	-1,00000	-1,00000	0,00000	3
3	-1,00000	-1,00000	1,00000	1
4	-1,00000	0,00000	-1,00000	18
5	-1,00000	0,00000	0,00000	15
6	-1,00000	0,00000	1,00000	12
7	-1,00000	1,00000	-1,00000	26
8	-1,00000	1,00000	0,00000	22
9	-1,00000	1,00000	1,00000	18
10	0,00000	-1,00000	-1,00000	4
11	0,00000	-1,00000	0,00000	2
12	0,00000	-1,00000	1,00000	1
13	0,00000	0,00000	-1,00000	16
14	0,00000	0,00000	0,00000	14
15	0,00000	0,00000	1,00000	11
16	0,00000	1,00000	-1,00000	20
17	0,00000	1,00000	0,00000	18
18	0,00000	1,00000	1,00000	16
19	1,00000	-1,00000	-1,00000	2
20	1,00000	-1,00000	0,00000	1
21	1,00000	-1,00000	1,00000	0,5
22	1,00000	0,00000	-1,00000	14
23	1,00000	0,00000	0,00000	12
24	1,00000	0,00000	1,00000	10
25	1,00000	1,00000	-1,00000	17
26	1,00000	1,00000	0,00000	14
27	1,00000	1,00000	1,00000	11

Рисунок 6 – График рассеивания наблюдаемых и предсказанных значений Cr^{3+}, г/л

Figure 6 – Scatter plot of the observed and predicted values of Cr3+, g/l

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

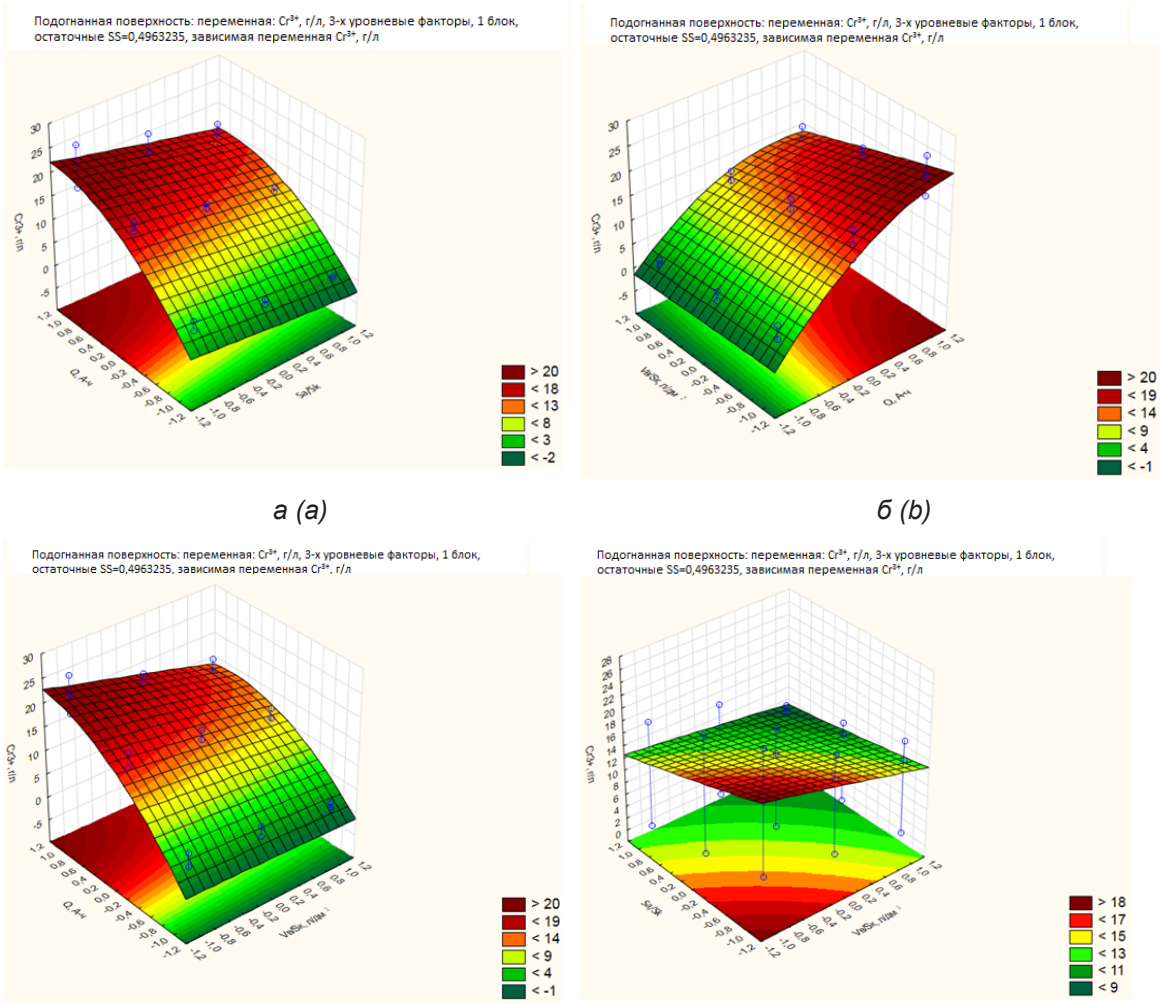


Рисунок 7 – Полученные поверхности зависимого фактора (Cr^{3+}) линейной модели при различных сочетаниях независимых факторов: а – влияние полученных значений Q, А-ч и S_a/S_k при среднем значении $V_в/S_k$, л/дм²; б – влияние полученных значений $V_в/S_k$, л/дм² и Q, А-ч при среднем значении S_a/S_k; в – влияние полученных Q, А-ч и Vв/Sk, л/дм² при среднем значении S_a/S_k; г – влияние S_a/S_k и $V_в/S_k$, л/дм² при среднем значении Q, А-ч

Figure 7 – The obtained surfaces of the dependent factor (Cr3+) of the linear model with various combinations of independent factors: a – the influence of the obtained values of Q, A-h and Sa/Sk at an average value of Vb/Sk, l/dm2; b – the influence of the obtained values of Vb/Sk, l/dm2 and Q, A-h at an average value of Sa/Sk; c – the influence of the obtained Q, A-h and Vb/Sk, l/dm2 at an average value of Sa/Sk; d – the influence of Sa/Sk and Vb/Sk, l/dm2 at an average value of Q, A-h

При обработке полученных результатов было получено, что все 27 точек располагаются в необходимой области факторного пространства, также они расположены симметрично относительно нуля, в результате которого закон их распределения близок к нормальному [25, 26, 27]. В результате этого влияние случайных и неслучайных факторов сведены к минимуму, при котором не требуется дополнительное проведение экспериментов (рисунок 6).

Для наглядности обработки данных и полученных результатов был проведен анализ факторов в зависимости от различных значений и влияния их на выходные данные Cr^{3+} (рисунок 7).

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Фактор	Оценки эффектов; R-кв.=,99403;Скор.,99087 (Таблица исходные 3-27-1) 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=,4963235 ЗП Cr3+, г/л									
	Эффект	Ст.Ош.	t(17)	p	-95,% Дов.Пред	+95,% Дов.Пред	Коэф.	Ст.Ош. Коэф.	-95,% Дов.Пред	+95,% Дов.Пред
Сред/Св.член	11,27778	0,135582	83,1808	0,000000	10,99173	11,56383	11,27778	0,135582	10,99173	11,56383
(1)Vв/Sк, л/дм²(L)	-4,38889	0,332106	-13,2153	0,000000	-5,08957	-3,68821	-2,19444	0,166053	-2,54479	-1,84410
Vв/Sк, л/дм²(K)	0,08333	0,287612	0,2897	0,775518	-0,52347	0,69014	0,04167	0,143806	-0,26174	0,34507
(2)Q, А-ч(L)	15,72222	0,332106	47,3410	0,000000	15,02154	16,42290	7,86111	0,166053	7,51077	8,21145
Q, А-ч(K)	3,41667	0,287612	11,8794	0,000000	2,80986	4,02347	1,70833	0,143806	1,40493	2,01174
(3)Sa/Sk(L)	-4,72222	0,332106	-14,2190	0,000000	-5,42290	-4,02154	-2,36111	0,166053	-2,71145	-2,01077
Sa/Sk(K)	-0,08333	0,287612	-0,2897	0,775518	-0,69014	0,52347	-0,04167	0,143806	-0,34507	0,26174
1L на 2L	-2,91667	0,406745	-7,1708	0,000002	-3,77482	-2,05851	-1,45833	0,203372	-1,88741	-1,02926
1L на 3L	1,25000	0,406745	3,0732	0,006889	0,39184	2,10816	0,62500	0,203372	0,19592	1,05408
2L на 3L	-1,41667	0,406745	-3,4829	0,002847	-2,27482	-0,55851	-0,70833	0,203372	-1,13741	-0,27926

Рисунок 8 – Анализ дисперсии при получении математической линейной модели

Figure 8 – Analysis of the evaluation of effects when obtaining a mathematical linear model

В результате математической обработки данных, полученных в виде графических изображений независимых факторов, влияющих на накопление Cr^{3+}, было установлено, что наиболее оптимальными значениями являются: $V_в/S_к$=80…100 л/дм², Q=120…200А-ч, $S_а/S_к$=3…4.

С целью получения уравнения регрессии с помощью программы Statistika были получены необходимые значимые коэффициенты, которые влияют на полученные значения по накоплению Cr^{3+} (рисунок 8).

При проведении дисперсионного анализа (см. рисунок 8) полученные данные в последних четырёх столбцах, взятых из полученных результатов расчёта программы Statistika, были включены как коэффициенты линейного уравнения регрессии при варьировании уровней значений зависимых факторов. Значения коэффициентов, выделенные красным, будут учитываться как значимые. В результате использования этих данных стало возможным вывести искомое уравнение регрессии получаемых значений накопления Cr^{3+}, при котором оно примет вид

$$Y=11,278-2,19X_1+7,86X_2-2,36X_3-1,45X_1X_2+0,625X_1X_3-0.708X_2X_3+1.708X_2^2, \quad (10)$$

где Y – предсказываемое значение накопления Cr^{3+}, г/л;

X_1, X_2, X_3 – перекодированные независимые факторы (-1, 0, +1).

В результате полученное уравнение регрессии даст возможность предсказать возможные значения накопления трёхвалентного хрома и тем самым предотвратить снижение производительности и качества получаемых хромовых покрытий, а также сэкономить время на химический анализ во время использования ванны хромирования при восстановлении или упрочнений деталей автотранспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при анализе полученных результатов и математической обработке данных было установлено, что для обеспечения нормальной работы ванны хромирования и использования всех преимуществ разработанного холодного саморегулирующегося электролита хромирования – выход метала по току 48…50%, микротвердость покрытий до 11500 Мпа и получение бестрещиноватых осадков, возникает необходимость соблюдения следующих условий:

1. Отношение площади анода к площади катода (восстанавливаемой поверхности детали) должно быть в пределах 3…4.
2. Концентрация Cr^{3+} в электролите должна поддерживается в пределах 2…15 г/л.
3. Отношение объёма электролита ванны хромирования к площади катода должно быть в пределах 80…100 л/дм².

Кроме того, было установлено, что концентрация Cr^{3+} в электролите прямо пропорционально зависит от количества пропускаемого через него электричества. При наступлении определённых значений будет накапливаться предельное количество Cr^{3+}, после чего необходимо провести корректировку на снижение концентрации путем проработки электролита при увеличенной площади анода по сравнению с катодом – в 2–3 раза больше.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Соблюдение выше указанных условий приведет к увеличению времени работы ванны хромирования и использования её с целью восстановления деталей автотранспорта. При этом будут снижаться затраты на электроэнергию при уменьшении брака с использованием разработанного холодного саморегулирующегося электролита хромирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17(1). С. 84–97.
2. Фомичев В.Т., Садовникова В.В., Москвичева Е.В. Легирование электролитического хрома молибденом в электролите, содержащем органические добавки // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3. С. 44–46.
3. Ткаченко И.Д. [и др.] Усовершенствование технологии хромирования с применением неорганических и органических композиций // Разработка и применение твердых металлических покрытий. 1981. С. 223–224.
4. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Сравнительная характеристика электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин. ВИНИТИ «Транспорт: наука, техника», Научно-информационный сборник, управление». 2020. № 7. С. 50–55.
5. Newby Kenneth, R. Functional chromium plating // Metal Finish. 2004. vol. 102. №4A. pp. 188-198.
6. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник МАДИ. 2021. №1 (64). С. 11–17.
7. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. №3 (70). С. 22–32.
8. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №3. С. 4–14.
9. Едигарян А.А., Полукаров Ю.М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Cr (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9. №3. С. 17–18.
10. Максименко С.А., Балакина О.А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3–4. С. 47–50.
11. Петров Ю.Н., Корнейчук Н.И. [и др.] Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинёв: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М.В. Фрунзе. 1979. С. 48–51.
12. Кудрявцев В.Н., Винокуров Е.Г., Кузнецов В.В. Толстослойное хромирование из электролитов на основе сернокислого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6. №1. С. 24–30.
13. Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Кудрявцев В.Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11. № 3. С. 31–33.
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. №317-318. pp. 612-618.
15. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020. 17(4). С. 500–511.
16. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // СБ научных трудов: Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск: НИ РХТУ, 2004. С. 44–51.
17. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Teil 11.. pp. 2888-2896.
18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflachenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. pp. 2095-2100.
19. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Chromsaurelosungen Galvanotechnik. 2005. №9. Teil. 1. pp. 2063-2071.
20. Корнейчук Н.И., Ковбасюк А.В. [и др.] Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. №144. С. 17–23.
21. Аджиев, Б.У., Ващенко С.В., Соловьева З.А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №1. С. 28–31.
22. Солодкова Л.Н., Соловьева З.А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30. №10. С. 1254–1256.
23. Шлугер М.А., Ток Л.Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 32. №3. С. 297–305.
24. Зорин В.А., Штефан Ю.В., Тимченко М.И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79. № 4. С. 5–13.
25. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента // *Вестник СибАДИ*. 2017. 2(54). С. 90–98.
26. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск 2004. Т. 7. Спец. выпуск. Ч. 1. С. 3–11.

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

27. Горбунов И.П., Горбунов Д.И. Математическое моделирование процесса диффузионного хромирования стали. Теория и практика производства листового проката. Сборник научных трудов. Ч. 2. Липецк: ЛГТУ, 2008. С. 68–72.

REFERENCES

1. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *K voprosu vybora sposoba vosstanovlenija detalej mashin* [To the question of choosing a method for restoring machine parts] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 17(1): 84-97.

2. Fomichev V.T., Sadovnikova V.V., Moskvicheva E.V. *Legirovanie jelektroliticheskogo hroma molibdenom v jelektrolite, soderzhashhem organicheskie dobavki* [Alloying of electrolytic chromium with molybdenum in an electrolyte containing organic additives] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 1992. vol. 1. no. 3. pp. 44-46.

3. Tkachenko I.D. i dr. *Usovershenstvovanie tehnologii hromirovanija s primeneniem neorganicheskih i organicheskih kompozicij* [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions] // *Razrabotka i primenenie tverdyh metallicheskih pokrytij*. Dnepropetrovsk: 1981: 223-224.

4. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *Sravnitel'naja harakteristika jelektrolitov hromirovanija dlja vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin*. [Comparative characteristics of chrome plating electrolytes for the restoration and hardening of machine parts] // *VINITI «Transport: nauka, tehnika»*, *Nauchno-informacionnyj sbornik, upravlenie»*. 2020. 7: 50-55

5. Newby Kenneth, R. *Functional chromium plating* // *Metal Finish*. 2004. 102(4A): 188-198.

6. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *Ispol'zovanie iznosostojkogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej* [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and strengthening of car parts] // Nauchnyj recenziruemyj zhurnal "*Vestnik MADI*". 2021. 1 (64): 11-17.

7. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. *Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin* [Intensification of the process of electrolytic chrome plating during restoration and hardening of machine parts] // *Mir transporta i tehnologicheskih mashin*. 2020. 3 (70): 22-32.

8. Elinek T.V. *Uspehi gal'vanotehniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody* [Advances in electroplating. World literature review for 2017-2018] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 2019. 27. (3): 4-14.

9. Edigarjan A.A., Polukarov Ju.M. *Jelektroosazhdenie hroma i ego splavov iz sul'fatnyh rastvorov Sg (III)* [Electrodeposition of chromium and its alloys from SG (III) sulphate solutions)] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 2001. 9(3): 17-18.

10. Maksimenko S.A., Balakina O.A. *Jelektroosazhdenie hromovyh pokrytij iz jelektrolitov na osnove hroma (3) i murav'inoj kisloty* [Electrodeposition of chromium coatings from electrolytes based on chromium (3) and formic acid] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 1992. 1(3-4): pp. 47-50.

11. Petrov Ju.N., Kornejchuk N.I. i dr. *Progressivnye sposoby vosstanovlenija detalej mashin i povyshenija ih prochnosti* [Progressive ways to restore machine parts and increase their strength] // *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Kishinjov: Kishinevskij sel'skohozjajstvennyj institut im. M.V. Frunze*, 1979: 48-51.

12. Kudrjavcev V.N., Vinokurov E.G., Kuznecov V.V. *Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokislogo hroma* [Thick-layer chromium plating from electrolytes based on chromium sulfate] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 1998. 6(1): 24-30.

13. Solodkova L.N., Vashhenko S.V., Kudrjavce V.N. *Vysokoproizvoditel'nyj jelektrolit iznosostojkogo hromirovanija* [High-performance wear-resistant chrome-plated electrolyte] // *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti*. 2003. 11(3): 31-33.

14. Baraldi P., Soragni E. *On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes* // J. Alloys and Compounds. 2001. 317-318: 612-618.

15. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F. *Ustanovka dlja podderzhanija rabochej temperatury jelektrolitov pri vosstanovlenii detalej mashin gal'vanicheskimi pokrytijami* [Anlage zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur der Elektrolyte bei der Reparatur von Maschinenteilen mit galvanischen Beschichtungen], *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 17(4): 500-511.

16. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V. *Osobennosti vlijanija temperatury na rasseivajushhuju sposobnost' jelektrolitov* [Features of temperature influence on the scattering capacity of electrolytes] // SB. *nauchnyh trudov: Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii. Novomoskovsk*: NI RHTU, 2004: 44-51.

17. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. 12 (11): 2888-2896.

18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflachenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. 103: 2095-2100.

19. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Chromsaurelosungen Galvanotechnik. 2005. 9(1): 2063-2071.

20. Kornejchuk N.I., Kovbasjuk A.V. i dr. *Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija* [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating] // Trudy Kishinevskogo SHI. 1975. 144: 17-23.

21. Adzhiev, B.U., Vashhenko S.V., Solov'eva Z.A. *Vlijanie struktury i fiziko-mehanicheskih svojstv hroma na iznosostojkost' hromovyh pokrytij* [Influence of the structure and physical and mechanical properties of chromium on the wear resistance of chrome coatings] // Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti. 1992. 1(1): 28-31.

22. Solodkova L.N., Solov'eva Z.A. *Issledovanie plenki na katode pri jelektrovosstanovlenii hromovoj*

kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid] // *Jelektrohimija*. 1994. 30. (10): 1254-1256.

23. Shluger M.A., Tok L.D. *Novye jelektrolity dlja pokrytij hromom i ego splavami* [New electrolytes for chromium and its alloys coatings] // Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D.I. Mendeleeva. 1988. vol. 32. no. 3. pp. 297-305.

24. Zorin, V.A., Shtefan Ju.V., Timchenko M.I. *Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnyh materialov* [Planning experiments when creating parts from composite materials] // *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018. 79(4): 5-13.

25. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. *Podbor sostavov aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov s ispol'zovaniem metoda planirovanija* jeksperimenta [Selection of activated mineral powder compositions using the experiment planning method] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2(54): 90-98

26. Vitjaz' P.A., Zhilinskij O.V., Laktjushina T.V. *Komp'juternaja metodologija vybora tehnicheski op-timal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovanija materialov* [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design] // *Fizicheskaja mezome-hanika*. Tomsk. 2004. T. 7. Spec. vypusk. Ch. 1: 3-11.27.

27. Gorbunov I.P., Gorbunov D.I. *Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnogo hromirovanija stali.* [Mathematical modeling of the process of diffusion chrome plating of steel] // Teorija i praktika proizvodstva listovogo prokata. *Sbornik nauchnyh trudov. Chast' 2. Lipeck: LGTU*, 2008: 68-72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» ORCID 0000-0002-4750-525, ResearcherID ABF-7049-2020 (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), (125329 г. Москва, Ленинградский пр., 64), старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета им. Т. Г. Шевченко (3300, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128, e-mail: aleshka81@list.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI) ORCID 0000-0002-4750-5255, ResearcherID ABF-7049-2020 (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave.), Senior Researcher of the Laboratory of the Renovation of Machinery and Equipment, T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St., e-mail: aleshka81@list.ru).

© 2004–2021 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal