

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97



ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ АНОДНО-ОКИСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Ефремов А.Н.

Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Излишне высокие затраты возникают из-за невозможности оптимального подбора режимов нанесения покрытий в промышленных условиях. Это связано с останковкой производства и сложностями перенастройки технического оборудования. Важным и в то же время критическим производственным процессом в гальваническом цехе Публичного акционерного общества «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО «МЗИК») является анодирование алюминия и его сплавов в растворе серной кислоты. Однако до сих пор не удалось повысить качество анодно-окисных покрытий, что приводит к избыточным затратам. **Цель работы.** Целью работы являлся анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах с помощью инструментов статистического анализа, а также применимость статистических методов управления качеством на гальваническом участке ПАО «МЗИК». **Используемые методы.** Анализ, направленный на выявление ключевой проблемы, связанной с возникновением дефектов, включал использование диаграммы Парето. Для более детальной оценки факторов, которые являются основной причиной возникновения наиболее значимых дефектов, была построена причинно-следственная диаграмма с использованием метода «мозгового штурма». **Результаты и практическая значимость.** Определены причины возникновения обнаруженных дефектов и разработаны корректирующие мероприятия по их устранению. Показано, что использование статистических методов позволяет снизить долю брака и находить «узкие места» на всех стадиях производства. Результаты могут быть использованы в качестве основы для создания модели поведения объекта, которая является составляющей частью виртуального элемента цифрового двойника.

Ключевые слова: статистические методы, диаграмма Парето, причинно-следственная диаграмма, диаграмма Исикавы, анодирование алюминия и его сплавов в серной кислоте, анодно-окисное покрытие на алюминии и его сплавах

© Ефремов А.Н., 2024

Для цитирования

Ефремов А.Н. Применение статистических методов для анализа дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 88-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

USING STATISTICAL METHODS FOR ANALYZING DEFECTS OF ANODIC OXIDE COATINGS ON DEFORMABLE ALUMINIUM ALLOYS

Efremov A.N.

PJSC Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Excessively high expenses result from an impossibility to make an optimal choice of coating modes in production. This is attributed to a need to stop the production and complexities of readjusting technological equipment. A crucial and critical technological process at the electroplating shop of Public Joint Stock Company Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg (PJSC MZIK) is an anodizing of aluminum and its alloys in a sulfuric acid solution. However, it is still not possible to improve the quality of anodic oxide coatings, leading to excessive costs. **Objectives.** The paper is aimed at analyzing and classifying anodic oxide coating defects found on deformable aluminum alloys, using statistical analysis tools, as well as applicability of statistical methods of quality management at the electroplating shop of PJSC MZIK. **Methods Applied.** To identify a key problem associated with causes of defects, an analysis was carried out using a Pareto chart. To assess in detail factors, presenting a main cause for the most significant defects, a causal diagram was built using a “brainstorming” method. **Results and Practical Relevance.** The causes for detected defects were determined and the corrective measures were developed to eliminate them. It has been shown that the statistical methods contributed to decreasing a share of defects and find “bottlenecks” at all the process stages. The results can be used as a basis for creating an object behavior model, which is a component of the virtual element of the digital twin.

Keywords: statistical methods, Pareto chart, causal diagram, Ishikawa diagram, anodizing of aluminum and its alloys in sulfuric acid, anodic oxide coating on aluminum and its alloys

For citation

Efremov A.N. Using Statistical Methods for Analyzing Defects of Anodic Oxide Coatings on Deformable Aluminium Alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 88-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-88-97>

Введение

В Публичном акционерном обществе «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО «МЗИК») к 2030 году планируется завершить строительство нового цеха гальванопокрытий. В реалиях жесткой конкуренции на рынке условием успешности организации является выпуск качественной продукции при минимальной себестоимости производства. В ПАО «МЗИК» нанесение анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах играет важную и критическую роль в удовлетворении потребностей заказчиков.

Наиболее признанным методом, позволяющим повысить защитные свойства алюминия и его сплавов от коррозии, является оксидирование. За счет формирования на поверхности оксидной пленки детали приобретают не только повышенную коррозионную стойкость в разных средах, но и комплекс ценных функциональных свойств – твердость, износостойкость, электроизоляционную способность и др. [1-7].

Для создания на поверхности алюминия и его сплавов оксидного слоя применяются химическое и электрохимическое оксидирование [1]. Варьируя толщину и структуру покрытия путем изменения условий проведения процесса оксидирования, можно добиться тех значений свойств, которые необходимы при эксплуатации изделия.

Анодное оксидирование является самым распро-

страненным видом обработки алюминия и его сплавов благодаря своей доступности и сравнительной дешевизне. В подавляющем большинстве случаев данный способ эффективно изменяет поверхность деталей, придавая им необходимые структурные, защитные, функциональные и физико-механические свойства.

Производство качественных алюминиевых изделий требует тщательного контроля на каждом этапе их обработки, что особенно важно при проведении анодирования. Анодное оксидирование – это ключевой этап в создании защитного слоя на алюминиевых деталях и сплавах, обеспечивая им повышенную устойчивость к износу и коррозии. Этот процесс начинается с ряда важных подготовительных работ, которые включают в себя очистку поверхности, а также другие процедуры подготовки металла к анодированию. Собственный процесс оксидирования следует после подготовки и является сердцевиной всей операции, где формируется защитная оксидная пленка. Значимым этапом является и заключительная обработка, которая дополняет анодирование и направлена на придание окончательных защитных свойств покрытию.

Между этими ключевыми этапами критически важно проводить тщательные межоперационные промывки. Эти промывки необходимы для удаления остатков химических веществ, например солей, которые могут оставаться после каждого из процессов. Они предотвращают потенциальное загрязнение и

обеспечивают лучшее сцепление слоев материала. Систематический контроль чистоты на каждом этапе является обязательным условием для получения высококачественного и долговечного покрытия.

Финишная обработка, придающая оксидной пленке завершённый вид, представляет собой важнейший финальный шаг в цепочке технологических процессов анодирования алюминия и его сплавов. Эта стадия может включать такие процессы, как окрашивание, герметизация или полировка, что придает деталям не только защитные, но и эстетические качества. Таким образом, всё вышеперечисленное демонстрирует сложность и многоступенчатость процесса анодного оксидирования алюминия, подчеркивая важность каждой отдельно взятой операции и межоперационной промывки для создания качественного и долговечного продукта.

Проведенные различными отечественными и зарубежными учеными исследования в области электрохимического оксидирования алюминия и его сплавов позволили выявить механизм образования оксидной пленки, а также влияние условий ведения процесса анодирования на ее основные свойства. Аккумулирован и большой производственный опыт применения технологий анодного оксидирования алюминия и его сплавов, представленный в справочной литературе [1-7].

Оксидирование может быть выполнено различными способами, включая оксидирование в водных электролитических растворах, плазменно-электролитическое оксидирование, в расплавах солей и в газовой плазме. Плазменно-электролитическое оксидирование имеет несколько подвидов, включая микродуговое оксидирование [2]. Однако наиболее широко применяется способ оксидирования в водных растворах электролитов, который обладает множеством преимуществ перед другими методами. Он легко автоматизируется и не требует мощных источников тока [3-7].

В настоящее время для анодного оксидирования алюминия и его сплавов предложены и используются в промышленных масштабах как кислые, так и щелочные электролиты, а также множество добавок к ним [1].

В промышленной практике наиболее распространены три основных электрохимических способа оксидирования – с использованием серной, хромовой и щавелевой кислот. Анодное оксидирование в растворе серной кислоты является наиболее распространенным методом в промышленности, включая ПАО «МЗИК». Его популярность объясняется рядом экономических преимуществ, возможностью легкой автоматизации и использованием переменного или постоянного тока. Этот метод позволяет получать оксидные покрытия с высокой адсорбционной способностью к различным типам покрытий, включая лакокрасочные или теплозащитные [3-7].

На рис. 1 представлена принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов, реализованная на участке гальванопокрытий ПАО «МЗИК».

Перечень требований к качеству анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах регламентирован тремя документами, стандартизованными на ПАО «МЗИК»: ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.031-74 и ПИ 1.2.616-2003. Правила приемки и методики контроля описаны в ГОСТ 9.302-88.

Для оценки качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах в данных стандартах регламентированы толщина, защитные свойства, степень наполнения и внешний вид. Однако в настоящее время не удалось сократить количество несоответствий в качестве анодно-окисных покрытий, что приводит к дополнительным расходам. Одним из способов оптимизации производственных процессов для решения возникающих проблем является разработка подходящей модели операции и применение статистических методов для управления качеством продукции. Поэтому целью настоящего исследования является анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, полученных из сернокислого электролита на гальваническом участке ПАО «МЗИК», с помощью инструментов статистического анализа, а также применимость статистических методов на производственном участке ПАО «МЗИК».

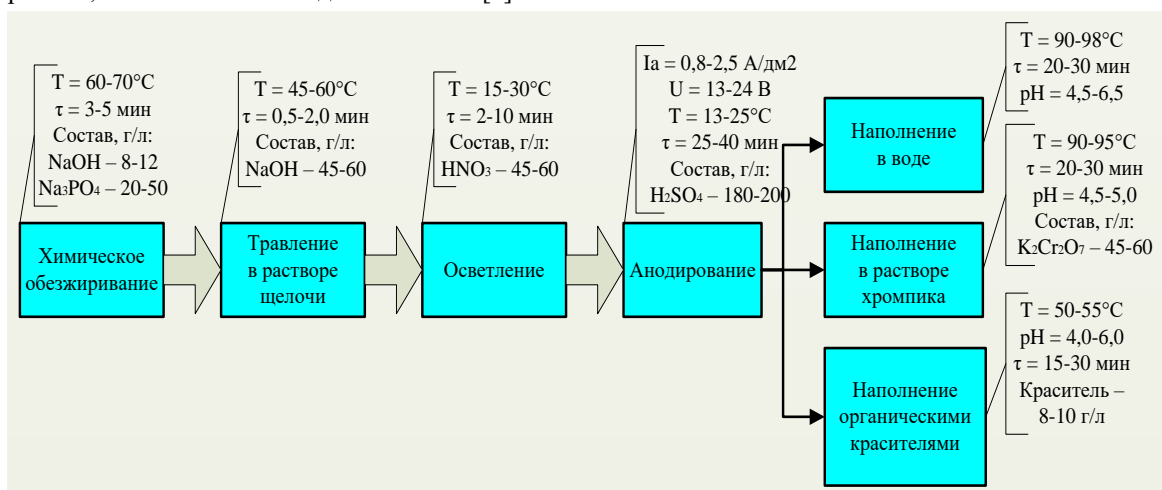


Рис. 1. Принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов
 Fig. 1. A process flow diagram of anodizing aluminum and its alloys

Материалы и методы исследования

В настоящей статье проводится анализ результатов контроля качества анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, нанесенных методом анодного оксидирования в сернокислом электролите на участке гальванопокрытий ПАО «МЗИК» в период с сентября 2021 по август 2022 года включительно. Составы растворов электролитов и технологические параметры ведения процесса представлены на **рис. 1**.

Эксперименты проводились на действующей полуавтоматической линии анодного оксидирования гальванического участка ПАО «МЗИК» в режиме реального времени. Для контроля параметров покрытий совместно с деталями на подвеску монтировались контрольные образцы. После анодирования на контрольных образцах исследовались такие параметры, как внешний вид, толщина, степень наполнения, защитные свойства.

Исследования проводились в потенциостатическом режиме с автоматической регистрацией на цифровой носитель силы тока, температуры и продолжительности процесса анодирования. Методика изготовления и подготовки контрольных образцов подробно описана в [18].

Контроль внешнего вида на выявление дефектов поверхности анодно-окисных покрытий осуществлялся внешним осмотром контрольных образцов невооруженным глазом на расстоянии 25 см от контролируемой поверхности при искусственном освещении не менее 300 лк.

Толщину покрытия на образцах определяли гравиметрически. После оксидирования контрольные образцы высушивались при температуре 60-70°C в течение 30 мин и после остывания взвешивались на аналитических весах Sartorius QUINTIX 224-10RU (Sartorius, Германия) с точностью до четвертого десятичного знака. Затем удаляли с образцов покрытие в растворе, содержащем 32-37 г/л H_3PO_4 и 20-25 г/л CrO_3 , при температуре 90-100°C. Объем травящего раствора должен быть 10 мл на 1 cm^2 покрытия.

Согласно ГОСТ 9.302-88, отсутствие покрытия на образцах можно определить методом капли. Несколько капель испытательного раствора (раствор №34) были нанесены на различные участки образца. Если капля мгновенно меняла свой цвет с оранжевого на зеленый, это свидетельствовало об отсутствии покрытия.

После удаления покрытия образцы были промыты водой, высушены и снова взвешены. Для определения массы анодного покрытия была вычислена разность массы образца после анодного оксидирования и после удаления покрытия.

Среднюю толщину анодно-окисного покрытия рассчитывали по формуле

$$\delta = \frac{0,1 \cdot P_{cp} \cdot 1,4}{3,42} = 0,04 \cdot P_{cp}, \quad (1)$$

где δ – толщина покрытия, мкм; 0,1 – коэффициент; P_{cp} – средняя масса покрытия на 1 dm^2 поверхности, мг; 3,42 – плотность покрытия, g/cm^3 ; 1,4 – поправочный коэффициент к плотности покрытия.

Для оценки степени наполнения образцов использовался метод потери массы, основанный на обработке образца с покрытием в испытательном растворе. Этот метод позволял определить потерю массы образца и, таким образом, определить степень наполнения. Для оценки качественной характеристики покрытия был проведен эксперимент следующего характера. Покрытый образец был помещен в раствор HNO_3 с концентрацией 500 г/л при температуре $20 \pm 5^\circ C$. После этого образец проходил процедуры промывки и сушки. Если покрытие теряло свой цвет после контакта с HNO_3 , то оно считалось неудовлетворительным.

В случае если покрытие не теряло цвет, образец помещался в эксикатор на 20 мин и после этого взвешивался. Затем образец погружался в испытательный раствор (10 г/л Na_2SO_4 , который доводят до pH = 3,6-3,8 раствором CH_3COOH , а затем раствором 500 г/л H_2SO_4 до pH = 2,5) при температуре $90 \pm 2^\circ C$ на 20 мин, промывался, высушивался, выдерживался в эксикаторе 20 мин и снова взвешивался.

Потеря массы рассчитывалась по уравнению

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{S}, \quad (2)$$

где Δm – уменьшение массы оксидного покрытия, mg/dm^2 ; m_1 – масса детали с нанесенным анодным покрытием, мг; m_2 – масса детали после снятия покрытия в растворе 34, мг; S – площадь поверхности исследуемого образца, dm^2 .

Согласно ПИ 1.2.616-2003 оценка результатов испытаний основана на следующем критерии: снижение массы тестируемых образцов после процедуры не должна превосходить установленный предел. Для изделий, используемых под открытым небом, этот предел установлен на уровне не более 20 mg/dm^2 , в то время как для продукции, предназначенной для использования в помещениях, лимит составляет 30 mg/dm^2 .

Защитные свойства анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах испытывались с помощью ускоренных коррозионных испытаний методом капли. При проведении исследований методом капли на поверхность покрытия образцов наносили 2-4 капли раствора, содержащего 250 мл/л HCl ($\rho = 1,19 g/cm^3$) и 30 г/л $K_2Cr_2O_7$, выдерживали определенное время в зависимости от типа сплава и температуры проведения испытаний и наблюдали за изменением цвета капли. Признак неудовлетворительного качества покрытия – изменение цвета капли от оранжевого до зеленого, что свидетельствует о проникновении коррозионного процесса до основного металла.

Для сбора и систематизации данных по контролю качества анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах использовались контрольные листки. Для выявления основной проблемы и причин несоответствий был проведен анализ с использованием диаграммы Парето. Для определения наиболее значимых дефектов был применен групповой метод анализа

причин, также известный как метод «мозгового штурма», и была построена причинно-следственная диаграмма Исикавы. Основные принципы и методики построения диаграмм Парето и Исикавы подробно описаны в [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Для построения диаграммы Парето обнаруженные дефекты были рассортированы по 11-ти группам. Результаты данных контроля, послужившие исходными данными для построения диаграммы Парето, представлены в **табл. 1**.

Таблица 1. Начальная информация для создания диаграммы Парето

Table 1. Initial information used to build the Pareto chart

| Номер дефекта | Вид дефекта | Число дефектов |
|---------------|---|----------------|
| 1 | Сползание или рыхлость покрытия | 27 |
| 2 | 1) Отсутствие пленки 2) Отсутствие покрытия на отдельных участках детали 3) Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен 4) Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу) | 61 |
| 3 | Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия | 45 |
| 4 | Растравливание покрытия | 34 |
| 5 | Темные полосы и пятна на покрытии | 22 |
| 6 | Темный налет в виде точек и пятен | 14 |
| 7 | Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна) | 7 |
| 8 | Серый порошкообразный налет на деталях | 3 |
| 9 | Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования | 8 |
| 10 | Темное покрытие | 9 |
| 11 | Хрупкость покрытия | 17 |

Диаграмма Парето на **рис. 2** отображает обнаруженные дефекты анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах на гальваническом участке ПАО «МЗИК» за период с сентября 2021 по август 2022 года.

Согласно данным на диаграмме (**рис. 2**), наиболее значимым дефектом является дефект №2. Поэтому первоочередной задачей является устранение причин его возникновения. Для анализа факторов, влияющих на появление дефекта №2, была использована диаграмма Исикавы с применением метода «мозгового штурма» (**рис. 3**).

Следует отметить, что марка используемого материала и способ изготовления заготовки (причина А1), состав электролита и параметры процесса анодирования (причина С), а также работа гальваника,

осуществляющего технологические операции на линии (причина D), могут быть основными причинами дефекта №2, согласно диаграмме Исикавы.

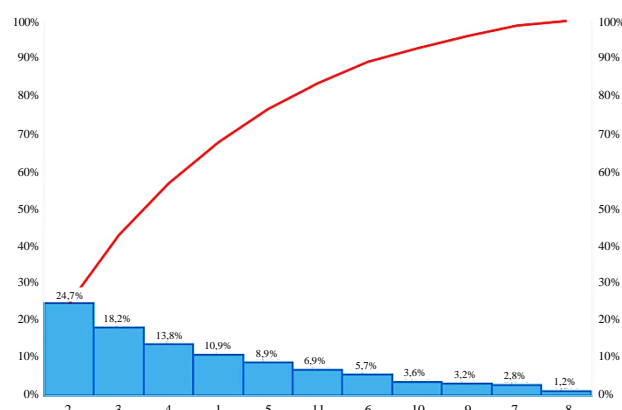


Рис. 2. Диаграмма Парето по дефектам оксидных покрытий на гальваническом производстве ПАО «МЗИК»

Fig. 2. The Pareto chart of detected defects of oxide coatings at the electroplating shop of PJSC MZIK

Исследование показало, что эти четыре причины составляют 92% всех дефектов. Для более точного анализа необходимо выяснить, какие типы дефектов связаны с каждой из этих причин и существует ли между ними взаимосвязь.

На **рис. 4** приведена усовершенствованная причинно-следственная диаграмма, основанная на данных из **табл. 1**. В этой улучшенной версии диаграммы внесены следующие изменения [9]:

1. В верхней части диаграммы представлены только те причины, которые полностью соответствуют традиционной диаграмме. Они обозначены опорными точками А, В, С, D.

2. Нижняя часть диаграммы наглядно демонстрирует последствия, связанные с причинами, отмеченными на соответствующих ветвях. Эти последствия выражены в процентах дефектов, которые были выявлены при использовании экспертного метода.

Из **рис. 4** видно, что основными причинами дефектов являются методы и материал изготовления детали (причины А), оборудование для анодирования (причины В), технологические параметры линии анодирования (причины С) и собственно персонал, выполняющий работы на участке (причины D).

Действительно коррозионная стойкость покрытий зависит от типа сплава подложки и состояния поверхности перед покрытием (причины А). Поверхность деталей может также содержать загрязнения, которые негативно сказываются на качестве покрытия (масла, смазки и др.). Кроме того, в приповерхностном слое алюминиевых сплавов содержатся легирующие добавки, которые также могут привести к ухудшению свойств получаемых покрытий.

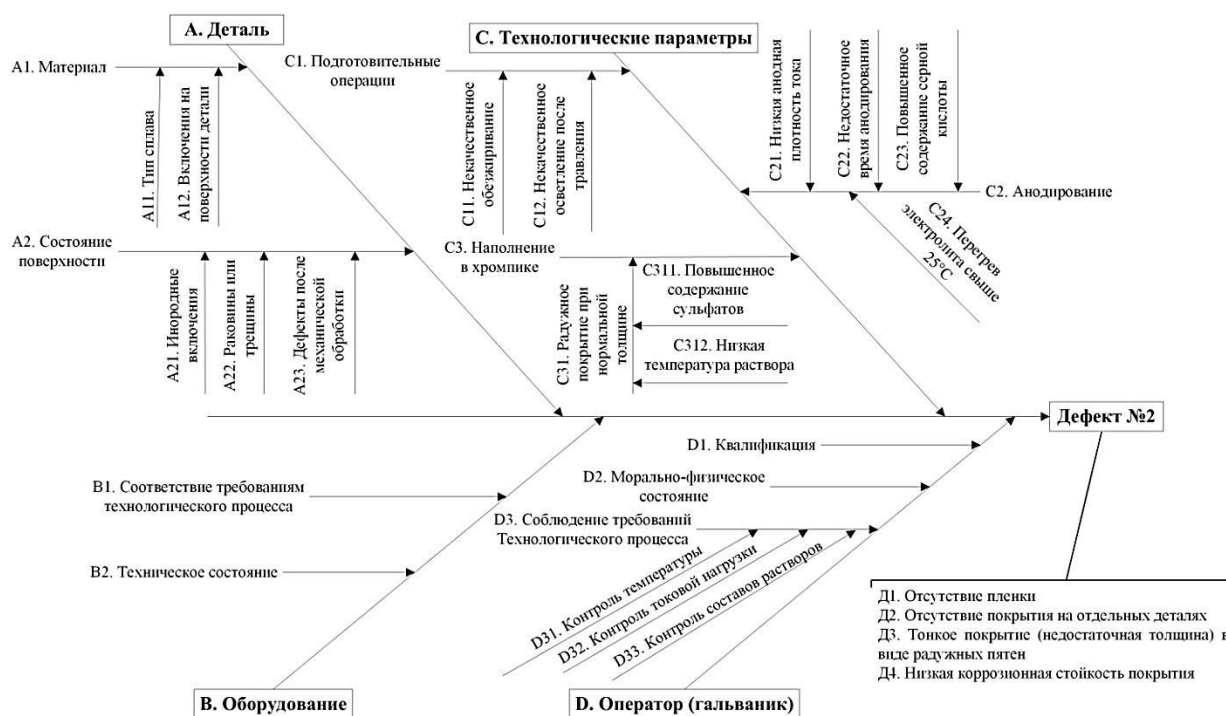


Рис. 3. Причинно-следственная диаграмма по обнаруженному дефекту №2 в стандартной форме
 Fig. 3. A causal diagram of detected defect No. 2 in the standard form

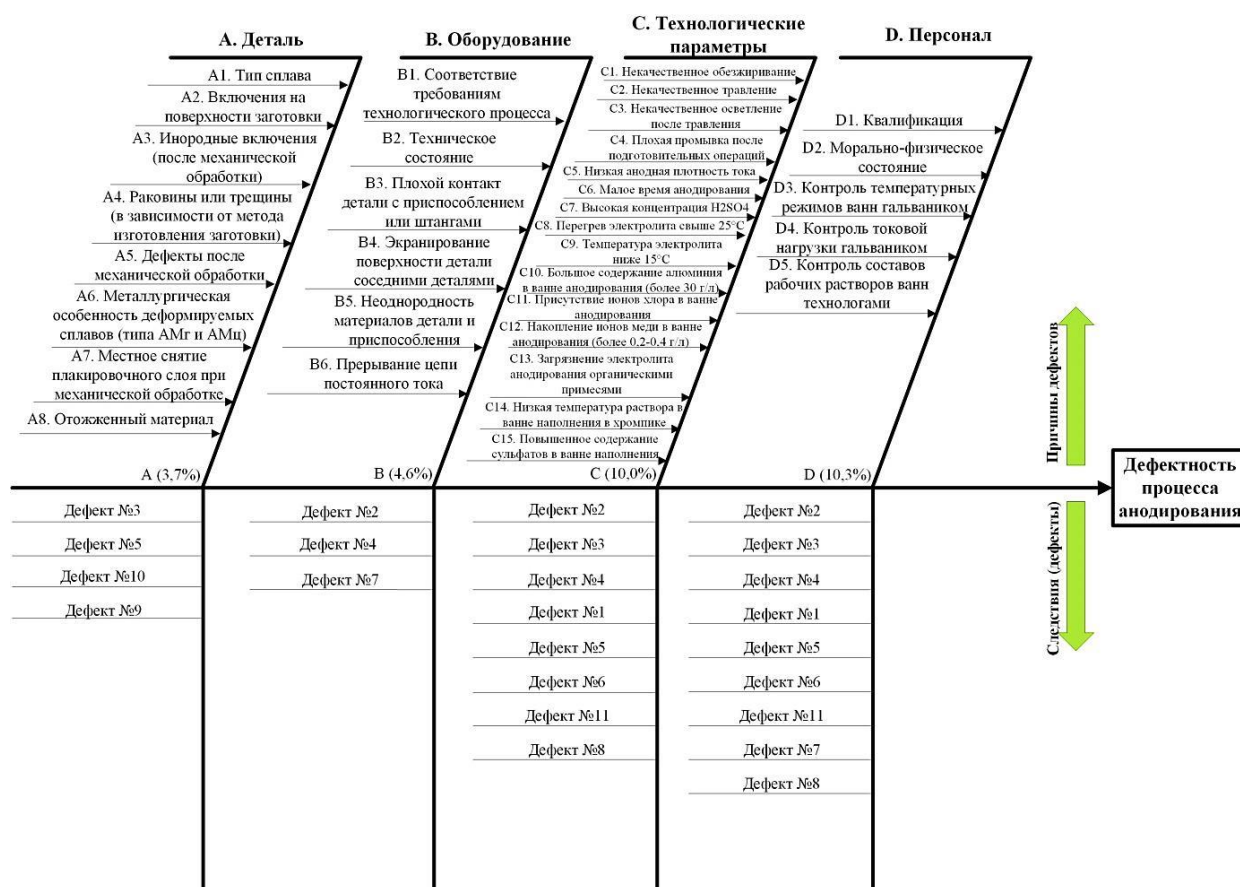


Рис. 4. Предлагаемая форма диаграммы Исикавы, построенная «по ходу» технологического процесса по всем обнаруженным дефектам

Fig. 4. A proposed form of the Ishikawa diagram built “in the course” of the technological process for all the detected defects

Наивысшая коррозионная стойкость наблюдается у покрытий, полученных на чистом алюминии [1]. Введение в состав алюминия таких примесей, как медь, кремний, железо, марганец, магний, улучшает механические свойства сплава, но снижает защитную способность получаемых анодно-окисных покрытий. Это обусловлено образованием интерметаллидов на поверхности, их разрушением и, как следствие, увеличением пористости получаемого покрытия. Чем меньше примесей в сплаве, тем однороднее получается покрытие, тем больше его толщина и меньше пористость покрытия.

К оборудованию (причины В) относятся не только выпрямители, ванны, бортовые отсосы и т.д., но и подвесочные приспособления и штанги. Правильный выбор технологической оснастки и последующий грамотный монтаж деталей на нее во многом определяют равномерность распределения электрических и тепловых полей внутри ванны анодирования, что сказывается на появлении дефектов №2, 4, 7. Поэтому в данном случае причины В напрямую коррелируют с причинами D, поскольку именно технолог и гальванщик отвечают за вышеупомянутые действия.

Эффективность оксидирования алюминия и его сплавов в значительной степени зависит от правильного выполнения предварительных операций подготовки. В процессе оксидирования сплавов алюминия на ПАО «МЗИК» проводятся химическое обезжиривание, травление и осветление поверхности деталей (см. рис. 1).

Химическое обезжиривание основано на нейтрализации жирных кислот и удалении растительных и животных жиров и масел. Применение добавки Na_3PO_4 улучшает качество воды и упрощает процесс смывки воды с поверхности изделий во время промывки. Эффективность эмульгирующего действия обезжиривающего раствора зависит от правильной концентрации щелочи (NaOH) и фосфата натрия (Na_3PO_4). Если концентрация щелочи слишком высока, это может снизить энергию на межфазной границе двух нерастворимых жидкостей. Также изменение содержания Na_3PO_4 может повлиять на результаты очистки поверхности. Для наиболее эффективного удаления минеральных масел и смазок рекомендуется проводить процесс при повышенных температурах, так как они плохо удаляются при нормальной температуре. Однако следует проявлять осторожность при повышении температуры, так как это может вызвать ускоренное травление и негативно повлиять на геометрию и состояние поверхности деталей. При продолжительном нахождении деталей в ванне для обезжиривания возможно растравливание поверхности и образование осадка фосфатов. Это может происходить также при превышении нормальной температуры раствора, высокой концентрации Na_3PO_4 или избыточном содержании щелочей, что приводит к образованию белого порошка на деталях (причина С1).

Травление в растворе щелочи проводится с целью удаления с поверхности деталей окалины, ржавчины или окисных слоев, образующихся при механической, термической, химической обработке или под воздействием окружающей среды. Несоблюдение технологических режимов операции травления, в частности передержка детали или перегрев раствора, а также завышенная концентрация NaOH приводят к растравливанию поверхности детали (причина С2).

Осветление в азотной кислоте необходимо для удаления темного налета легирующих примесей, образующегося после травления, а также оставшихся пятен, ухудшающих внешний вид деталей. При низкой концентрации HNO_3 в растворе или недостаточной продолжительности процесса на поверхности остается темный налет оксида меди или следы пригоревшей смазки. Наличие контактно высадившейся меди на поверхности алюминия после осветления свидетельствует о высокой концентрации ионов меди в растворе. Все дефекты поверхности, видимые на поверхности после осветления, будут неблагоприятно влиять на внешний вид анодно-окисного покрытия.

Немаловажным аспектом являются и промывочные операции после каждой из подготовительных операций (причина С4). Основная цель промывки – не только удаление соединений и остатков предыдущих операций с поверхности изделий, но и снижение их попадания в сточные воды при экономичном использовании воды.

Некачественная промывка приводит к появлению дефектов №3, 4 и 5.

В табл. 2 систематизирована и показана взаимосвязь причин и дефектов, а также представлены корректирующие мероприятия для их устранения применительно к ванне анодного оксидирования.

После анодного оксидирования для повышения коррозионной стойкости покрытий чаще всего применяют наполнение пор дихроматами. В данной операции решающими факторами, влияющими на степень наполнения, являются толщина и пористость анодно-окисного покрытия. Недостаточная толщина покрытия приводит к бледной окраске и неудовлетворительной коррозионной стойкости покрытия (недостаточное время выдержки при капельной пробе). Кроме того, низкая температура раствора и избыток сульфатов в ванне наполнения также приводят к подобным дефектам покрытия. Повышенное содержание сульфатов может вызвать растравливание покрытия. Немаловажное значение в ванне наполнения играет рН раствора: при $\text{pH} > 5,5$ образуется мажущееся покрытие, при $\text{pH} < 4,5$ образуется «липкое» покрытие. К липкости покрытия также приводят низкая температура раствора, недостаточное время наполнения и покрытие большой толщины при малой пористости. Корректировку рН раствора следует проводить для его понижения до значений 4,5-5,0 хромовым ангидридом, для повышения рН – добавлением кальцинированной соды.

Таблица 2. Перечень дефектов анодно-окисных покрытий на алюминиевых деформируемых сплавах, возможные причины их возникновения и корректирующие мероприятия по их устранению
 Table 2. A list of defects of anodic oxide coatings found on aluminum deformable alloys, potential causes and corrective measures

| Номер дефекта | Вид дефекта | Код причины | Возможная причина возникновения | Корректирующие мероприятия |
|---------------|---|-------------|---|--|
| 1 | Сползание или рыхлость покрытия | С8 | Перегрев электролита свыше 25°C | Охладить электролит перемешиванием |
| | | С6 | Завышенное время анодирования | Снизить продолжительность оксидирования |
| | | С10 | Большое содержание Al^{3+} в растворе (более 30 г/л) | Откорректировать электролит, слив половину |
| 2 | 1) Отсутствие пленки 2) Отсутствие покрытия на отдельных участках детали 3) Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен 4) Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу) | В3 | Плохой контакт детали с приспособлением | Улучшить контакт |
| | | В4 | Экранирование поверхности детали | Изменить способ монтажа |
| | | С5 | Низкая анодная плотность тока | Повысить плотность тока до 1-2 А/дм ² |
| | | С6 | Недостаточное время анодирования | Увеличить продолжительность анодирования |
| | | С7 | Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите | Откорректировать электролит (разбавить водой) |
| | | С8 | Перегрев электролита свыше 25°C | Охладить электролит перемешиванием |
| 3 | Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия | С11 | Присутствие ионов Cl^- в электролите | Сменить электролит |
| | | С8 | Температура раствора свыше 30°C | Охладить электролит перемешиванием |
| | | С4 | Плохая промывка деталей после подготовки | Улучшить качество промывки |
| | | А1 | Большое содержание меди в составе сплава | Применять другой электролит |
| 4 | Растравливание покрытия | С4 | Плохая промывка от H_2SO_4 после анодирования | Улучшить качество промывки |
| | | С4 | Плохая промывка от HNO_3 после осветления | Улучшить качество промывки |
| | | В6 | Прерывание цепи постоянного тока | Не допускать прерывания тока при анодировании |
| | | С8 | Перегрев электролита свыше 25°C | Охладить электролит перемешиванием |
| | | С6 | Завышенное время анодирования | Снизить продолжительность оксидирования |
| | | С7 | Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите | Откорректировать электролит (разбавить водой) |
| | | В5 | Неоднородность материалов деталей и подвески | Заменить материал подвески |
| 5 | Темные полосы и пятна на покрытии | С12 | Накопление Cu^{2+} в электролите в количестве более 0,2-0,4 г/л | Проработка электролита со стальными катодами при плотности тока 1-2 А/дм ² или замена электролита |
| | | А5 | Местный прижог при механической обработке | Не является браковочным признаком по ГОСТ 9.301 |
| | | С4 | Плохая промывка деталей после подготовки | Улучшить качество промывки |
| | | А1 | Большое содержание меди в составе сплава | Применить другой электролит |
| 6 | Темный налет в виде точек и пятен | С13 | Загрязнение электролита органическими примесями | Фильтрация электролита; обработка в HNO_3 |
| 7 | Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна) | В3 | Плохой контакт детали с приспособлением | Улучшить контакт |
| 8 | Серый порошкообразный налет на деталях | С1-С3 | Некачественная подготовка деталей перед покрытием | Улучшить качество подготовительных операций |
| 9 | Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования | А6 | Металлургическая особенность деформируемых сплавов (типа АМг и АМц) | Длительная выдержка в азотной кислоте (до 60 мин) перед повторным анодированием |
| | | А7 | Местное снятие лакировочного слоя при механической обработке | |
| 10 | Темное покрытие | А8 | Отожженный материал | Провести закалку и повторно анодировать детали |
| 11 | Хрупкость покрытия | С9 | Температура электролита ниже 15°C | Нагреть электролит (отключить перемешивание) |

Взаимосвязь причин С и D (см. рис. 4) очевидна, ведь все операции на линии анодирования выполняются оператором линии (гальваником), а контроль составов электролитов закреплен за технологами гальванического участка. Поэтому разработка модели прогнозирования качества покрытий при различных условиях производства на основе статистических методов является эффективным подходом для уменьшения влияния человеческого фактора при установлении технологических режимов.

Заключение

Таким образом, на реальном производственном объекте проведен анализ и систематизация дефектов анодно-окисных покрытий на алюминиевых деформируемых сплавах, получаемых из сернокислого электролита методом электрохимического оксидирования (анодирования). Методами статистического анализа определены причины возникновения обнаруженных дефектов и разработаны корректирующие мероприятия по их устранению.

По результатам исследований, проведенных в работах [8, 10], выяснено, что наиболее значимыми свойствами, определяющими все показатели качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, являются толщина, пористость и микротвердость. Кроме того, нормативная документация также подтверждает важность этих свойств. Поэтому для создания модели физических процессов виртуального элемента цифрового двойника линии анодирования необходимо учесть математические модели указанных свойств, построенных с учетом технологических параметров анодирования.

В настоящее время одной из ключевых задач является разработка цифровой модели объекта, которая будет точно воспроизводить его геометрию, физические свойства и поведение системы, а также учитывать особенности функционирования. Такая модель поможет оптимизировать процессы подготовки и производства, сократить расходы на материалы, уменьшить потери металла из-за брака и уменьшить роль человеческого фактора.

Данная статья является продолжением цикла работ, результаты данной работы будут использованы в качестве основы для создания модели поведения объекта, которая является еще одной составляющей частью виртуального элемента цифрового двойника.

В рамках завершения исследования была разработана модель, которая сможет воспроизводить динамику получения анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, интегрируя информацию с производственной линии. Этот инструмент станет одним из ключевых в создании цифрового прототипа для анодирования, моделируя его работу в виртуальном пространстве.

Список источников

1. Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Фарафонов В.Л. Развитие технологии анодного оксидирования

алюминия и его сплавов. Обзор публикаций за 2007-2018 г. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №2. С. 9-22. DOI: 10.47188/0869-5326-2019-27-2-9

2. Влияние технологических параметров на свойства покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования / Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В., Козлов Г.В., Зинченко Т.О., Смогунов В.В. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. №2(32). С. 89-99. DOI: 10.21685/2307-5538-2020-2-11
3. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth / Poznyak A.A., Pligovka A., Laryn T. and Salerno M. // Materials. 2021, vol. 14, no. 4, pp. 1-16. DOI: 10.3390/ma14040767
4. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions / Enkeleda Dervishi, Michael McBride, Randall Edwards, Moraya Gutierrez, Nan Li, Raven Buntyn, Daniel E. Hooks // Surface and coatings technology. 2022, vol. 444, 128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652
5. Patermarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential // Current topics in electrochemistry. 2020, vol. 22, pp. 1-17.
6. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy / Jeanette M. Torrescano-Alvarez, Michele Curioni, Xiaorong Zhou, Peter Skeldon // Surface and interface analysis. 2019, vol. 51, no. 12, pp. 1135-1143. DOI: 10.1002/sia.6562
7. Patermarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodizing of aluminium // Current topics in electrochemistry. 2019, vol. 21, pp. 21-39.
8. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. №2. С. 66-80. DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
9. Управление качеством. Современные статистические методы контроля и управления качеством продукции в производстве / Юдин С.В., Остапенко С.Н., Протасьев В.Б., Кривов А.С., Гурьянов В.П., Юдин А.С., Волков М.В., Палихов Г.В.; под ред. проф. Остапенко С.Н. М., 2020. 184 с.
10. Ефремов А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2022. Т. 1. №10 (103). С. 6-13. DOI: 10.31618/ESU-2413-9335-2022-1-103-1730

References

1. Skopintsev V.D., Margolin L.N., Farafonov V.L. Development of the anodizing technology for aluminum and its alloys. Review of publications for 2007-2018.

- Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment]. 2019;27(2):9-22. (In Russ.) DOI: 10.47188/0869-5326-2019-27-2-9
2. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V., Kozlov G.V., Zinchenko T.O., Smogunov V.V. The influence of technological parameters on the properties of coatings synthesized by microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measuring. Monitoring. Management. Control]. 2020;(2(32)):89-99. (In Russ.) DOI: 10.21685/2307-5538-2020-2-11
 3. Poznyak A.A., Pligovka A., Laryn T., Salerno M. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth. *Materials*. 2021;14(4):1-16. DOI: 10.3390/ma14040767
 4. Enkeleda Dervishi, Michael McBride, Randall Edwards, Moraya Gutierrez, Nan Li, Raven Buntyn, Daniel E. Hooks. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2022;444:128652. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128652
 5. Patermarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential. *Current Topics in Electrochemistry*. 2020;22:1-17.
 6. Jeanette M. Torrescano-Alvarez, Michele Curioni, Xiaorong Zhou, Peter Skeldon. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy. *Surface and Interface Analysis*. 2019;51(12):1135-1143. DOI: 10.1002/sia.6562
 7. Patermarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodizing of aluminium. *Current Topics in Electrochemistry*. 2019;21:21-39.
 8. Efremov A.N. A mathematical model for predicting thickness of the anodic oxide coating on AMg6 aluminum alloy. *Vestnik Kontserna VKO Almaz – Antey* [Journal of Almaz – Antey Air and Space Defense Corporation]. 2023;(2):66-80. (In Russ.) DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
 9. Yudin S.V., Ostapenko S.N., Protasiev V.B., Krivov A.S., Guryanov V.P., Yudin A.S., Volkov M.V., Palikhov G.V. *Upravlenie kachestvom. Sovremennye statisticheskie metody kontrolya i upravleniya kachestvom produktsii v proizvodstve* [Quality management. Modern statistical methods of product quality control and management in industry]. Moscow: 2020, 184 p. (In Russ.)
 10. Efremov A.N. Architecture of a mathematical model for predicting the quality of anodic oxide coatings on aluminum and its alloys. *Evrazijskiy soyuz uchenykh. Seriya: Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki* [The Eurasian Union of Scientists. Series: Technical and Physical and Mathematical Sciences]. 2022;1(10(103)):6-13. (In Russ.) DOI: 10.31618/ESU-2413-9335-2022-1-103-1730

Поступила 21.11.2023; принята к публикации 28.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 21/11/2023; revised 28/01/2024; published 28/03/2024

Ефремов Андрей Николаевич – аспирант, начальник бюро технического контроля, Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург», Екатеринбург, Россия. Email: andrey_effremuss@mail.ru. ORCID 0000-0003-0023-3202

Andrey N. Efremov – postgraduate student, Head of the Technical Control Bureau, Public Joint Stock Company Kalinin Machine-Building Plant, Yekaterinburg, Yekaterinburg, Russia. Email: andrey_effremuss@mail.ru. ORCID 0000-0003-0023-3202