

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:  
Ефремов, А.Н. Моделирование скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов в растворах щелочей / А.Н. Ефремов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 31–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.04

Please cite this article in English as:  
Yefremov A.N. Modeling of the etching rate of deformable aluminum alloys in alkali solutions. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 31-39. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.04

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 26, № 2, 2024**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.04

УДК 658.562.3:519.248

**А.Н. Ефремов**

Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, Екатеринбург, Российская Федерация

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ТРАВЛЕНИЯ**  
**ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАСТВОРАХ ЩЕЛОЧЕЙ**

В процессе изготовления, транспортировки и хранения изделия из алюминия и его сплавов подвергаются различным видам воздействий окружающей среды, что приводит к образованию на их поверхности окисных слоев и продуктов коррозии, оказывающих негативное влияние на качество последующих технологических операций, в частности, нанесение анодно-окисного покрытия. Поэтому перед анодированием одной из подготовительных операций является травление алюминиевых сплавов с последующим осветлением. Учесть аспект поверхностного травления алюминия в процессе обработки щелочными растворами – важная задача при выборе технологических параметров подготовительных операций. Для предотвращения растравливания поверхности основного металла необходимо учесть этот фактор. Целью исследования является моделирование скорости травления различных деформируемых сплавов алюминия в зависимости от различных технологических параметров процесса травления. В пакете MATLAB построены регрессионные модели скорости травления деформируемых сплавов алюминия от различных технологических параметров процесса травления. Проведена оценка качества построенных моделей с применением различных статистических критериев (дисперсионный анализ, тест Бартлетта, критерий Льюнга – Бокса, критерий Колмогорова – Смирнова) и показано, что полученные модели адекватно описывают набор экспериментальных данных. Установлено, что ключевыми факторами являются концентрация щелочи, температура и время травления для всех видов сплавов. Виртуальный элемент цифрового двойника линии анодирования алюминиевых сплавов может включать построенные модели, которые представляют собой составные части комплексной математической модели предварительной подготовки поверхности перед анодированием алюминиевых сплавов.

**Ключевые слова:** скорость травления, деформируемые сплавы алюминия, травление в растворе щелочи, технологические параметры травления, математическое моделирование, регрессионный анализ, дисперсионный анализ, тест Бартлетта, критерий Льюнга – Бокса, критерий Колмогорова – Смирнова.

A.N. Yefremov

PJSC Machine-building plant named after M.I. Kalinin, Yekaterinburg, Russian Federation

## MODELING OF THE ETCHING RATE OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS IN ALKALI SOLUTIONS

During the manufacturing, transportation and storage products made of aluminum and its alloys are exposed to various environmental influences, which leads to the formation of oxide layers and corrosion products on their surface, which have a negative impact on the quality of subsequent technological operations, in particular, the anode-oxide coating deposition. Therefore, before anodizing one of the preparatory operations is the etching of aluminum alloys with subsequent lightening. Since processing in alkaline solutions causes not only the removal of impurities, but also surface etching of aluminum, it is necessary to take this aspect into account when choosing the technological parameters of preparatory operations in order to avoid etching the surface of the base metal. Aim of present work is to simulate the etching rate of various deformable aluminum alloys depending on various etching process parameters. Regression models of the etching rate of deformable aluminum alloys on various technological parameters are obtained in the MATLAB package. The quality of the constructed models was evaluated using various statistical criteria (variance analysis, Bartlett test, Leung-Box criterion, Kolmogorov-Smirnov criterion) and it was shown that the constructed models adequately describe the experimental data. It is established that the key factors are the concentration of alkali, temperature and etching time for all types of alloys. The constructed models can be used as components of a complex mathematical model of preliminary surface preparation before anodizing aluminum alloys, which in turn will be part of the virtual element of the digital twin of the aluminum alloy anodizing line.

**Keywords:** etching rate, deformable aluminum alloys, etching in alkali solution, technological parameters of etching, mathematical modeling, regression analysis, analysis of variance, Bartlett test, Leung – Box criterion, Kolmogorov – Smirnov criterion.

Обрабатывая поверхность металла, необходимо учитывать множество факторов, которые влияют на его функциональные характеристики. Одним из основных препятствий для хорошей адгезии покрытия с основой являются загрязнения, которые могут быть как механического, так и химического характера. Кроме того, продукты коррозии также могут помешать надлежащему сцеплению покрытия с поверхностью металла. Однако и это не единственные причины, влияющие на состояние поверхности металла. При любой механической обработке, такой как изготовление или обработка деталей, возникают и другие факторы, негативно сказывающиеся на поверхности металла. Например, деформация кристаллической решетки металла, скопление инородных включений или скрытые дефекты могут присутствовать на поверхности. Все это, включая риски, забоины, раковины и шероховатость поверхности, ухудшают прочностные характеристики материала и его антикоррозионные свойства [1–3].

В ПАО «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО МЗИК) для подготовки изделий из алюминия и его сплавов к нанесению покрытий проводятся три основные операции – обезжиривание, травление и осветление. На рис. 1 представлена принципиальная схема подготовительных операций деталей из алюминия и его сплавов, применяемая на ПАО МЗИК (на рисунке не показаны межоперационные промывки).

Следует помнить, что на поверхности металла могут накапливаться разнообразные загрязнения. Они могут иметь разные свойства и природу и существенно влиять на процесс адгезии покрытия к поверхности.

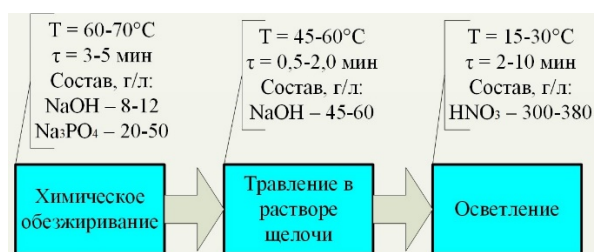


Рис. 1. Принципиальная схема подготовительных операций для деталей из алюминия и его сплавов, применяемая на ПАО МЗИК

Поэтому важным этапом в обработке поверхности алюминия является ее обезжиривание. В процессе обезжиривания осуществляется удаление различных загрязнений, связанных с металлом адгезионными силами. Это могут быть такие загрязнения, как жиры, консервационные смазки, остатки полировочных паст, абразивы или охлаждающие эмульсии. Этот этап позволяет создать оптимальную поверхность металла для нанесения покрытий и обеспечить качественное сцепление между покрытием и основой.

Исследование процесса травления деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов АМц, АМг6БМ, АМг3М, в растворе NaOH является важным этапом при анодировании. Данный процесс не только дает возможность удалить термическую окалину и коррозионные продукты, но и разрушает связи между загрязнениями и металлом.

В ходе травления в растворе NaOH происходит химическая реакция, в результате которой образуется травильный шлак, прочно связанный с поверхностью деталей. Важным шагом после травления является осветление, позволяющие удалить этот травильный шлак и вернуть поверхности металла их первоначальный блеск и гладкость.

Исследование процесса травления и осветления алюминиевых сплавов оптимизирует параметры процесса травления, такие как концентрация NaOH и время травления. Также важно определить оптимум между процессами травления и осветления, чтобы достичь максимально эффективного удаления загрязнений без негативного воздействия на структуру металла.

Травление и осветление являются неотъемлемыми этапами обработки изделий из алюминия и его сплавов и применяются в различных отраслях промышленности. Наиболее часто травление используется для удаления оксидных пленок и сульфидных отложений, которые могут ухудшить качество изделий и привести к их деформации или разрушению. Осветление же позволяет вернуть поверхности металла их первоначальные характеристики и эстетический вид. От правильного проведения этих процессов зависит долговечность и внешний вид металлических изделий [1–4].

Таким образом, изучение и оптимизация процесса травления сплавов АМгЗМ, АМг6БМ, АМц являются актуальной и важной задачей, которая требует учета влияния различных факторов и параметров процесса на скорость травления и качество получаемых изделий.

В связи с этим основное внимание уделялось изучению влияния концентрации щелочи  $C_a$ , времени травления  $\tau$  и температуры  $T$  на скорость травления различных сплавов, в частности на скорость травления сплавов АМгЗМ, АМг6БМ, АМц.

Для достижения целей исследования были проведены натурные эксперименты на полуавтоматической линии анодирования на ПАО МЗИК. По полученным экспериментальным данным были построены эмпирические уравнения, которые позволили определить зависимость скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов от концентрации щелочи, температуры и времени травления.

Основываясь на данных предыдущих исследований [4], в табл. 1 представлен журнал планирования эксперимента процесса травления сплавов АМгЗМ, АМг6БМ, АМц: указаны пределы значений контролируемых параметров, которые использовались в экспериментах.

Таблица 1

Планирование эксперимента процесса травления

| Контролируемые параметры | $C_a$ , г/л | $\tau$ , мин | $T$ , °С |
|--------------------------|-------------|--------------|----------|
| Верхний предел           | 65          | 4,00         | 90       |
| Нижний предел            | 35          | 0,50         | 30       |
| Рабочее значение         | 50          | 2,25         | 60       |

Эксперименты проводились на контрольных образцах размером 100×50 мм и толщиной 2 мм из

сплавов АМгЗМ, АМг6БМ, АМц в количестве 3 штук каждого наименования, монтировавшихся совместно со штатными изделиями в различные места рабочего пространства ванны. Предварительно образцы подвергались подготовительным операциям, а именно обезжириванию органическим растворителем, сушке и взвешиванию (аналитические весы Sartorius QUINTIX 224-10RU (Sartorius, Германия)) с точностью до четвертого десятичного знака. Перед каждым экспериментом проводился химический анализ электролита на содержание NaOH [5]. Контроль температуры и времени травления в ходе экспериментов осуществлялся автоматически. После экспериментов образцы извлекались, промывались, просушивались и вновь взвешивались. Скорость травления определяли по разности масс образца до и после травления, отнесенной к площади образца.

Математическое моделирование проводилось в среде MATLAB, где значения концентрации NaOH в электролите, температура и время травления выступали в качестве независимых переменных (факторов), а скорость травления сплавов ( $\text{г/дм}^2$ ) – в качестве функции отклика (зависимой переменной).

При наличии большого количества экспериментальных данных более предпочтительным решением становится проведение гладкой средней линии между точками. Это позволяет применить простую интерполяцию многочленом или сплайнами, что увеличит точность анализа и расширит возможности исследования.

Для точного определения модели зависимости между переменными и минимизации погрешности возможно использование метода наименьших квадратов (далее – МНК). Идея МНК заключается в выборе модели  $y = y(x, \beta)$  с неизвестным параметром  $\beta$ , и последующем подборе этого параметра таким образом, чтобы минимизировать суммарные отклонения. Основная метрика погрешности в МНК – это сумма квадратов отклонений известных значений  $Y_i$  от модельных  $\hat{Y}_i = y(X_i, \beta)$  [6–10].

На рис. 2 представлена нотация моделирования скорости травления деформируемых сплавов алюминия в среде MATLAB.

Для сравнения методом МНК математическую модель строили в двух видах:

$$V_{\text{корр}} = b_0 + b_1 C_a + b_2 T + b_3 \tau + \varepsilon, \quad (1)$$

$$V_{\text{корр}} = b_0 + b_1 C_a + b_2 T + b_3 \tau + b_4 C_a T + b_5 C_a \tau + b_6 T \tau + b_7 C_a^2 + b_8 \tau^2 + b_9 T^2 + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $V_{\text{корр}}$  – скорость травления,  $\text{г/дм}^2$ ;  $b_i$  – коэффициент регрессионного уравнения;  $C_a$  – концентрация щелочи в ванне травления,  $\text{г/л}$ ;  $T$  – температура

раствора травления, °C;  $\tau$  – время травления, мин;  $\varepsilon$  – остатки [4].

Полученные оценки коэффициентов регрессионных уравнений  $b_i$  проверялись на значимость с помощью критерия Стьюдента. Для установления статистической значимости коэффициентов регрессии применяется  $P$ -значение как оценка. Если  $P$ -значение ниже заданного уровня значимости  $\alpha$ , то это свидетельствует о значимости коэффициента на данном уровне значимости.  $P$ -значение является важным инструментом для оценки стабильности и надежности полученных результатов в МНК. При его использовании можно определить, какие коэффициенты регрессии вносят существенный вклад в модель и являются статистически значимыми, а какие можно исключить из анализа [11].

Затем, последовательно исключая незначимые факторы, начиная с максимального значения, вновь проводилось моделирование методом МНК. Модель считалась адекватной при условии, когда  $P$ -значения для всех коэффициентов регрессионного уравнения удовлетворяли условию  $P < \alpha$  [12].

На следующем этапе необходимо удостовериться, что мы правильно определили незначимые факторы. Проверка осуществляется при помощи критерия Фишера. Условием правильно отброшенных факторов является значение  $P_i > \alpha$ .

Далее рассчитываются доверительные интервалы для полученных коэффициентов регрессионного уравнения и дисперсии ошибок.

Доверительные интервалы для дисперсии ошибок рассчитываются по формуле:

$$\frac{\hat{S}}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)} \leq \sigma^2 \leq \frac{\hat{S}}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(n-m)}, \quad (3)$$

где  $\hat{S}$  – остаточная сумма квадратов,  $\chi^2$  – квантиль нормального распределения,  $n$  – число измерений,  $m$  – число факторов.

Доверительные интервалы для коэффициентов регрессии рассчитываются как:

$$b_j - t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)s_j < \beta_j < b_j + t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-m)s_j, \quad (4)$$

где  $b_j$  – вектор коэффициентов модели,  $t$  – квантиль Стьюдента,  $s_j$  – стандартная ошибка.

На следующем этапе проводится графическая проверка резких выбросов из данных модели. Для удаления резко выделяющихся выбросов строился график доверительных интервалов остатков. В качестве примера на рис. 3 представлен такой график для сплава АМгЗМ.

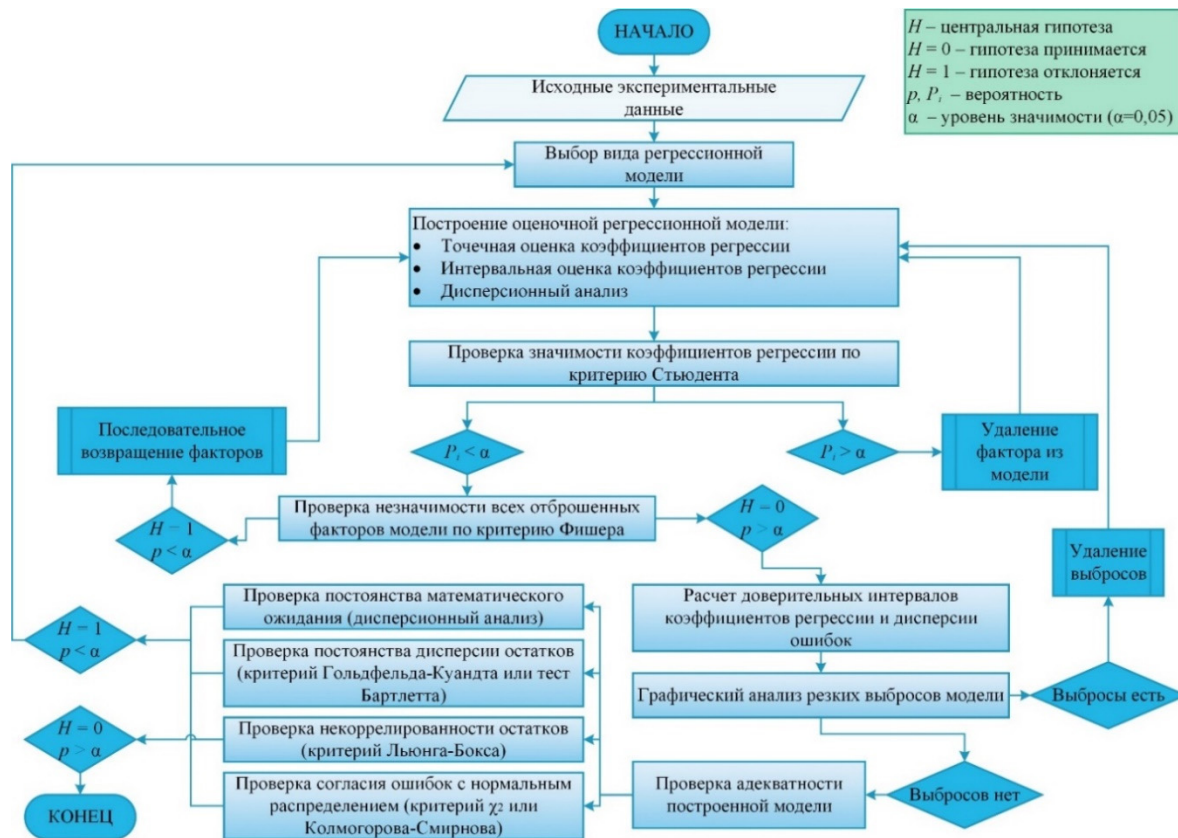


Рис. 2. Алгоритм (нотация) моделирования скорости травления деформируемых сплавов алюминия в среде MATLAB

После удаления выбросов из исходных данных вновь проводится моделирование методом МНК. Полученные уравнения регрессии скорости травления в растворе NaOH для разных деформируемых алюминиевых сплавов и их статистические критерии представлены в табл. 2.

Анализ статистических критериев уравнений, представленных в табл. 2 для каждого сплава, позволяет сделать вывод о более высоком коэффициенте детерминации  $R^2$  в уравнениях (6), (8) и (10). Этот коэффициент указывает на долю объясненной вариации зависимой функции относительно своего среднего. Таким образом, уравнения (6), (8) и (10) обладают большей точностью, чем уравнения (5), (7), (9).

Для определения значимости уравнения в целом применяется статистика Фишера  $F$ . Это важный инструмент, который позволяет оценить влияние факторов на зависимую функцию. Результаты статистического исследования позволяют понять, насколько значимо уравнение в целом и какие факторы играют наиболее существенную роль. В данном случае, уравнения (6), (8) и (10) демонстрируют более высокую значимость и важность в предсказании зависимой переменной. Это может быть связано с особенностями и характеристиками выборки, а также с учетом дополнительных факторов, которые не были рассмотрены в других уравнениях.

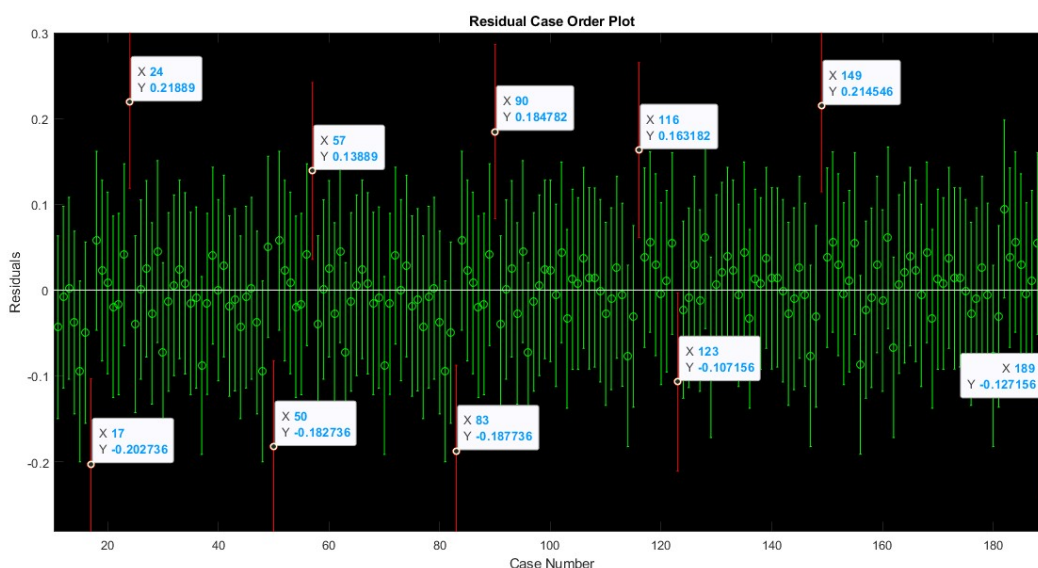


Рис. 3. График доверительных интервалов остатков регрессионной модели для сплава АМг3М в среде MATLAB

Таблица 2

Уравнения регрессии скорости травления в растворе NaOH для разных деформируемых алюминиевых сплавов и их статистические критерии

| Сплав | Уравнение  | № уравнения | $R^2$ | $F$    | Станд. ошибка |
|-------|--|-------------|-------|--------|---------------|
| АМг3М | $V_{\text{корр}} = -0,657 - (3,7 \cdot 10^{-3})C_a + 0,015T + 0,152\tau$   | (5)         | 0,819 | 293,1  | 0,174         |
|       | $V_{\text{корр}} = 0,032C_a - 0,031T - 0,166\tau + (8,4 \cdot 10^{-5})C_aT + (5,5 \cdot 10^{-3})T\tau + (3,6 \cdot 10^{-4})C_a^2 + (2,5 \cdot 10^{-4})T^2$ | (6)         | 0,991 | 3029,4 | 0,054         |
| АМг6  | $V_{\text{корр}} = -0,483 - (3,5 \cdot 10^{-3})C_a + 0,012T + 0,132\tau$   | (7)         | 0,852 | 349,7  | 0,123         |
|       | $V_{\text{корр}} = 0,843 - 0,027C_a - 0,01T - 0,09\tau + (3,9 \cdot 10^{-3})T\tau + (2,8 \cdot 10^{-4})C_a^2 + (1,1 \cdot 10^{-4})T^2$                     | (8)         | 0,993 | 4137,7 | 0,027         |
| АМц   | $V_{\text{корр}} = -0,018C_a + 0,016T + 0,179\tau$   | (9)         | 0,897 | 86,7   | 0,247         |
|       | $V_{\text{корр}} = 1,312 - 0,068C_a - 0,003C_a\tau + 0,005T\tau + (7,4 \cdot 10^{-4})C_a^2 + (5,3 \cdot 10^{-5})T^2$                                       | (10)        | 0,983 | 317,6  | 0,104         |

Важным выводом, который можно сделать на основе анализа статистических данных, является то, что уравнения (6), (8) и (10) обладают большой значимостью. Необходимо отметить, что данные уравнения более точно описывают зависимость скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов в растворе NaOH согласно всем статистическим критериям. В связи с этим в дальнейшем исследовании мы сосредоточимся исключительно на анализе и понимании этих уравнений.

После расчета доверительных интервалов для коэффициентов регрессии и дисперсии ошибок построенные регрессионные модели проверяются на адекватность. Данная проверка необходима для оценки способности построенных моделей прогнозировать значения функции отклика с той же точностью, как и экспериментальные данные, на основе которых они построены.

Проверка на адекватность связана с выполнением исходных предпосылок относительно остатков регрессии  $\varepsilon$  (условия Гаусса – Маркова) [13]:

1. Математическое ожидание остатков равно нулю, т.е.  $M\varepsilon_i = 0, i = 1, \dots, n$ . Для проверки данной гипотезы строятся графики остатков от всех факторов за исключением константы. Это позволяет более подробно исследовать и анализировать поведение остатков и их соответствие гипотезе о равенстве нулю математического ожидания. Такой подход позволяет убедиться в правильности выбора уравнений в качестве наиболее значимых и точных моделей. Гипотеза принимается при условии, что численные значения переменных и остатков имеют одинаковый порядок. В среде MATLAB данная гипотеза реализована с применением дисперсионного анализа. Разбивая выборку на различное число групп и с применением функции *anova1*, проводится проверка постоянства математического ожидания. Критерием принятия гипотезы считается условие  $p > \alpha$  вне зависимости от числа групп разбиения [14].

2. Дисперсия остатков гомоскедастична, т.е.  $D\varepsilon_i = \sigma^2, i = 1, \dots, n$ . Постоянство дисперсии остатков регрессионной модели можно проверить с помощью теста Бартлетта. Для проверки постоянства дисперсии остатков нормальных совокупностей применяется критерий Бартлетта  $V_{\text{расч}}$ . Это вычисленное значение критерия сравнивается с критическим значением  $\chi^2$  со степенями свободы  $k=n-1$ , при выбранном уровне значимости  $\alpha$ . Если вычисленное значение критерия  $V_{\text{расч}}$  меньше критического значения  $\chi^2$ , то это говорит об однородности дисперсий [14].

3. Остатки независимы и некоррелированы, т.е.  $\varepsilon_i = 0, i = 1, \dots, n$ . Для подтверждения некоррелированности остатков сначала строится график

автокорреляционной функции и далее применяется критерий Льюнга – Бокса для проверки данной гипотезы. Если  $p$ -значение больше уровня значимости  $\alpha$  [15], то мы принимаем нулевую гипотезу о независимом распределении остатков. Это является важным шагом в анализе результатов и позволяет сделать выводы о корректности модели.

4. Остатки подчиняются нормальному закону распределения. Для проверки гипотезы о нормальности распределения остатков регрессионной модели можно проверить с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. Если вектор остатков подчиняется нормальному закону распределения с вероятностью  $p$ , то такая гипотеза принимается согласно данному критерию [16].

При невыполнении данных предположений нарушаются условия использования теоремы Гаусса – Маркова, а полученные оценки коэффициентов  $b_i$  не являются эффективными и несмещенными. Вычисленные  $t$ -статистики фактически не согласуются с  $t$ -распределением, поэтому доверительные интервалы и проверка гипотез по стандартным формулам даёт неверные результаты.

В качестве примера в табл. 3 показаны критерии проверки на адекватность регрессионного уравнения для сплава АМг6 (уравнение (8)).

Таблица 3

Критерии проверки адекватности регрессионного уравнения (8) для сплава АМг6

| Гипотеза  | Инструмент проверки             | $h^*$ | $p^{**}$  |
|---|---------------------------------|-------|-----------|
| Проверка равенства математического ожидания остатков нулю | Дисперсионный анализ            | 0     | 0,08+0,52 |
| Проверка постоянства дисперсии остатков                   | Тест Бартлетта                  | 0     | 1         |
| Проверка некоррелированности остатков                     | Критерий Льюнга – Бокса         | 0     | 0,12+0,25 |
| Проверка согласия остатков с нормальным распределением    | Критерий Колмогорова – Смирнова | 0     | 0,92      |

Примечание: \* $h$  – центральная гипотеза ( $h=0$  – гипотеза принимается,  $h=1$  – гипотеза отклоняется); \*\* $p$  – вероятность.

Для уравнений (6), (8) и (10) получены схожие результаты при проверке на адекватность, позволяющие сделать вывод, что построенные регрессионные модели зависимости скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов АМг3М, АМг6 и АМц в растворе NaOH в зависимости от технологических параметров можно считать адекватными.

Исследованию коррозионных процессов, протекающих при взаимодействии алюминия и его сплавов с растворами щелочей, посвящено большое

число работ [17–23]. В большинстве своем авторы работ рассматривают механизм коррозии алюминия и его сплавов в щелочных растворах как электрохимический процесс с точки зрения теории локальных элементов.

В работах [17–22] представлены результаты исследований скорости коррозии алюминия и его сплавов Д16, АА1100-Н14 (по составу близок к сплаву АДС), 6063 (по составу близок к сплаву АД31). Все исследования проводились при комнатной температуре. Авторами получены графические зависимости  $V_{\text{корр}} = f(\text{pH})$ . В работе [19] представлены температурные зависимости  $\ln(V_{\text{корр}}) = f(1/T)$  в диапазоне концентраций NaOH 0,05–0,50 моль/л, имеющие линейный характер, а также рассчитана энергия активации процесса коррозии алюминиевого сплава 6063. В работе [20] рассмотрено влияние добавки меди в сплавы алюминия (до 1000 ppm) и температуры на скорость коррозии алюминия и его сплавов с добавками меди. Исследования проводились в растворе 1,25М NaOH в течение часа. Показано, что с увеличением концентрации меди в сплаве скорость коррозии при температуре 25 °С увеличивается со 103 до 168 мг/(см<sup>2</sup>·мин) для чистого алюминия и сплава, содержащего 1000 ppm меди, соответственно. Увеличение температуры с 25 до 70 °С для сплава AlCu1000 приводит к увеличению скорости коррозии почти в 15 раз. В работе [21] дан широкий обзор влияния различных факторов (рН, концентрации легирующих элементов сплава, температуры, скорости перемешивания и др.) на коррозионное и электрохимическое поведение алюминия и его сплавов в различных средах. В работе [22] исследовано влияние концентрации NaOH на скорость травления алюминия при температуре 30 °С. Показано, что скорость травления увеличивается с ростом концентрации щелочи.

Наибольший интерес представляет работа [23]. Работа посвящена изучению коррозионных процессов алюминия марок А0, А00, а также его сплавов АМц, АМг, Д16 и В95 в щелочных растворах NaOH. Показано, что скорость коррозии выбранных сплавов выше, чем у чистого алюминия. Определено, что примесь меди в сплавах оказывает наиболее сильное разрушающее действие при травлении вследствие создания на поверхности сплава электрохимической неоднородности поверхности. Результаты измерения скорости коррозии сплавов АМц и АМг в данной работе приведены для температуры 25 °С.

В табл. 4 представлено сравнение скорости коррозии деформируемых алюминиевых сплавов, полученной из уравнений (6), (8) и (10), с экспериментальными данными работы [23].

Таблица 4

Скорость коррозии деформируемых алюминиевых сплавов

| Параметр       |          |                        | Скорость коррозии $V_{\text{корр}}$ , г/(дм <sup>2</sup> ·мин) |        |       |
|----------------|----------|------------------------|--|--------|-------|
| $C_a$ , моль/л | $T$ , °С | Источник данных        | АМц  | АМг3 М | АМг6  |
| 1,0            | 25       | [23]                   | 0,025  | 0,027  |       |
| 1,5            | 25       |                        | 0,033  | 0,034  |       |
| 0,910          | 30,87    | Настоящее исследование | 0,024  | 0,028  | 0,032 |
| 1,492          | 29,95    |                        | 0,026  | 0,031  | 0,037 |

Из табл. 4 видно, что данные моделирования хорошо согласуются с литературными. Отклонения в результатах могут быть обусловлены рядом причин. Важно обратить внимание на условия получения данных, так как они могут существенно отличаться от производственных условий, как в работе [23]. Особое влияние на точность результатов оказывает чистота используемых реактивов и геометрический фактор, что подтверждается данными [21]. Во-вторых, в работе [23] результаты получены на образцах цилиндрической формы относительно небольшой площади 0,005 дм<sup>2</sup>. Вместе с тем, математические модели, положенные в фундамент данной работы, были разработаны на основе данных для образцов с площадями поверхности 0,2 и 0,56 дм<sup>2</sup>.

Таким образом, в настоящей работе в среде MATLAB выполнено моделирование скорости травления деформируемых алюминиевых сплавов АМг3М, АМг6 и АМц в растворе NaOH. Получены регрессионные уравнения, описывающие зависимости скорости травления алюминиевых сплавов АМг3М, АМг6 и АМц в растворе NaOH в зависимости от технологических параметров процесса травления. Показано, что в определенной выборке критическими характеристиками для процесса травления являются концентрация NaOH, температура и время травления. Проведена проверка регрессионных зависимостей на адекватность с применением статистических критериев.

Построенные модели могут быть использованы как составные части виртуального элемента цифрового двойника линии анодирования алюминиевых сплавов [24–26]. Однако для полного и точного моделирования процесса необходимо включить все этапы данного процесса, поэтому эти модели станут лишь компонентами большой комплексной математической модели. Такой подход позволяет учесть все факторы и особенности процесса анодирования алюминиевых сплавов, такие как условия окружающей среды, состав алюминиевого сплава, применяемые электролиты и прочие

параметры. Благодаря использованию комбинированной математической модели виртуального двойника, можно получить максимально точные результаты и определить оптимальные условия для анодирования.

Преимущество такого подхода заключается в том, что он позволяет провести предварительное моделирование процесса анодирования, что значительно сокращает время и затраты на проведение экспериментов. Также использование виртуального элемента цифрового двойника дает возможность проводить масштабные исследования и оптимизацию процесса без необходимости в реальных испытаниях на алюминиевых сплавах.

### Библиографический список

1. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес. – М.: ПИК ВИНТИ, 1994. – 191 с.
2. Скопинцев, В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов / В.Д. Скопинцев. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 120 с.
3. Аверьянов, Е.Е. Справочник по анодированию / Е.Е. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. Ефремов, А.Н. Моделирование скорости травления алюминиевого сплава АМц в растворе щелочи / А.Н. Ефремов // Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества». 19–20 сентября 2023 г.: сборник докладов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 71–78.
5. ОСТ 92-1479-78. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы анализа электролитов и растворов. – М., 1978. – 429 с.
6. Рыков, В.В. Математическая статистика и планирование эксперимента / В.В. Рыков, В.Ю. Иткин. – М.: МАКС Пресс, 2010. – 308 с.
7. Иткин, В.Ю. Интерполяция и сглаживание данных в пакете MATLAB / В.Ю. Иткин, О.Н. Кочуева. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – 135 с.
8. Рыков, В.В. Основы компьютерного моделирования (модели математической статистики) / В.В. Рыков, В.Ю. Иткин. – М.: Отдел оперативной полиграфии РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2006. – 144 с.
9. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / Е.А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилёв; под общ. ред. Е.А. Трофимовой; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 160 с.
10. Эконометрия / В.И. Суслев, Н.М. Ибрагимов, Л.П. Талышева, А.А. Цыплаков. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 744 с.
11. Кеткина, О.С. Возможности MS EXCEL для регрессионного анализа [Электронный ресурс] / О.С. Кеткина; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), 2020. – 43 с. – URL: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132//1/ЭОР-Кеткина%20О.С.\\_%202020.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132//1/ЭОР-Кеткина%20О.С._%202020.pdf) (дата обращения: 11.11.2023).
12. Иткин, В.Ю. Методы нечёткой логики в задачах нефтегазовой отрасли: учебное пособие [Электронный ресурс] / В.Ю. Иткин, О.Н. Кочуева; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – 121 с. – URL: <https://elib.gubkin.ru/content/24820> (дата обращения: 12.11.2023).
13. Любимцев, О.В. Линейные регрессионные модели в эконометрике / О.В. Любимцев, О.Л. Любимцева. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2016. – 44 с.
14. Лемешко, Б.Ю. Критерии Бартлетта и Кокрена в измерительных задачах при вероятностных законах, отличающихся от нормального / Б.Ю. Лемешко, Е.П. Миркин // Измерительная техника. – 2004. – № 10. – С. 10–15.
15. Кремер, Н.Ш. Эконометрика: учебник для вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.
16. Орлов, А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении / А.И. Орлов // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 97. – С. 31–45.
17. Герасимов, В.В. Коррозия алюминия и его сплавов / В.В. Герасимов. – М.: Металлургия, 1967. – 114 с.
18. Vargel, C. Corrosion of Aluminium / C. Vargel. – 2<sup>nd</sup> Edition. – Elsevier Science, 2020. – 858 p.
19. Prabhu, D. Corrosion behavior of 6063 aluminum alloy in acidic and in alkaline media / D. Prabhu, P. Rao // Arabian Journal of Chemistry. – 2017. – Vol. 10. – S2234–S2244. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.059
20. Dahlstrøm, M. Effect of Copper Content on etching Response of Aluminum in Alkaline and Acid Solutions / M. Dahlstrøm // Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering. – 2012. – 69 p.
21. Davis, J.R. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys / J.R. Davis. – ASM International, 1999. – 313 p. – DOI: 10.1361/caaa1999p001
22. Botis, M. Study about aluminium etching / M. Botis // Nonconventional Technologies Review, 2019. – P. 3–7.
23. Лукашук, Т.С. Коррозионное поведение алюминия и его сплавов в растворах гидроксида натрия / Т.С. Лукашук, В.И. Ларин // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Серия: Химия. – 2009. – Т. 870, № 17(40). – С. 253–258.
24. Ефремов, А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах / А.Н. Ефремов // 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
25. Ефремов, А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 / А.Н. Ефремов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». – 2023. – № 2. – С. 66–80. – DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
26. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.



## References

1. Grilikhes S.Ia. Obezshirivanie, travlenie i polirovanie metallov [Degreasing, pickling and polishing of metals]. Moscow: PIK VINITI, 1994, 191 p.
2. Skopintsev V.D. Oksidirovanie aliuminiia i ego splavov [Oxidation of aluminum and its alloys]. Moscow: RKhTU imeni D.I. Mendeleeva, 2015, 120 p.
3. Aver'ianov E.E. Spravochnik po anodirovaniu [Anodizing guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 224 p.
4. Efremov A.N. Modelirovanie skorosti travleniia aliuminievogo splava AMts v rastvore shchelochi [Modeling of etching rate of aluminum alloy AMz in alkali solution]. *Vserossiiskaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia «Ot kachestva instrumentov k instrumentam kachestva». 19–20 sentiabria 2023 g.: sbornik dokladov*. Tula: Izdatelstvo TulGU, 2023. pp. 71–78.
5. OST 92-1479-78. Pokrytiia metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody analiza elektrolitov i rastvorov [Metallic and non-metallic inorganic coatings. Methods of analyzing electrolytes and solutions]. Moscow, 1978, 429 p.
6. Rykov V.V. Matematicheskaiia statistika i planirovanie eksperimenta [Mathematical statistics and experiment planning]. V.V. Rykov, V.Iu. Itkin. Moscow: MAKS Press, 2010, 308 p.
7. Itkin V.Iu. Interpoliatsiia i sglazhivanie dannykh v pakete MATLAB [Interpolation and smoothing of data in MATLAB package]. V.Iu. Itkin, O.N. Kochueva. Moscow: Izdatel'skii tsentr RGU nefii i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina, 2019, 135 p.
8. Rykov V.V. Osnovy komp'iuternogo modelirovaniia (modeli matematicheskoi statistiki) [Fundamentals of computer modeling (mathematical statistical models)]. V.V. Rykov, V.Iu. Itkin. Moscow: Otdel operativnoi poligrafii RGU nefii i gaza im. I.M. Gubkina, 2006, 144 p.
9. Trofimova E.A., Kisliak N.V., Gilev D.V. Teoriia veroiatnostei i matematicheskaiia statistika: ucheb. posobie [Probability theory and mathematical statistics: textbook]. Ed. E.A. Trofimovoi. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2018, 160 p.
10. Suslov V.I., Ibragimov N.M., Talyшева L.P., Tsyplakov A.A. Ekonometriia [Econometrics]. Novosibirsk: SO RAN, 2005, 744 p.
11. Ketkina O.S. Vozmozhnosti MS EXCEL dlia regressiionnogo analiza [MS EXCEL capabilities for regression analysis]. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina (UrFU), 2020, 43 p. URL: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132//1/EOR-Ketkina %20O.S.\\_%202020.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/14132//1/EOR-Ketkina%20O.S._%202020.pdf) (data available 11.11.2023).
12. Itkin V.Iu. Metody nechetkoi logiki v zadachakh neftegazovoi otrasli: uchebnoe posobie [Fuzzy logic methods in oil and gas industry problems: textbook]. Moscow: RGU nefii i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina, 2021, 121 p. URL: <https://elib.gubkin.ru/content/24820> (data available 12.11.2023).
13. Liubimtsev O.V., Liubimtseva O.L. Lineinye regressiionnye modeli v ekonometrike [Linear regression models in econometrics]. Nizhni Novgorod: NNGASU, 2016, 44 p.
14. Lemeshko B.Iu., Mirkin E.P. Kriterii Bartletta i Kokrena v izmeritel'nykh zadachakh pri veroiatnostnykh zakonakh, otlichaiushchikhsia ot normal'nogo [Bartlett's and Cochran's criteria in measurement tasks with probability laws that differ from the normal one]. *Izmeritel'naia tekhnika*, 2004, no. 10, pp. 10–15.
15. Kremer N.Sh., Putko B.A. Ekonometrika: uchebnik dlia vuzov [Econometrics: textbook for universities]. Moscow: IuNITI-DANA, 2002, 311 p.
16. Orlov A.I. Neparаметricheskie kriterii soglasiiia Kolmogorova, Smirnova, omega-kvadrat i oshibki pri ikh primenenii [Kolmogorov, Smirnov, omega-square nonparametric criteria of agreement and errors in their application]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*, 2014, no. 97, pp. 31–45.
17. Gerasimov V.V. Korroziia aliuminiia i ego splavov [Corrosion of aluminum and its alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 1967, 114 p.
18. Vargel, C. Corrosion of Aluminium / C. Vargel. – 2nd Edition. – Elsevier Science, 2020. – 858 p.
19. Prabhu D. Corrosion behavior of 6063 aluminum alloy in acidic and in alkaline media. D. Prabhu, P. Rao. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017, vol. 10, pp. 2234–S2244. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.07.059
20. Dahlström M. Effect of Copper Content on etching Response of Aluminum in Alkaline and Acid Solutions. *Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering*, 2012, 69 p.
21. Davis J.R. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. *ASM International*, 1999, 313 p. DOI: 10.1361/caaa1999p001
22. Botis M. Study about aluminium etching. *Nonconventional Technologies Review*, 2019, pp. 3–7.
23. Lukashchuk T.S., Larin V.I. Korroziionnoe povedenie aliu-miniiia i ego splavov v rastvorakh gidroksida natriia [Corrosion behavior of aluminum and its alloys in sodium hydroxide solutions]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo universiteta im. V.N. Karazina. Seriia: Khimiia*, 2009, vol. 870, no. 17(40), pp. 253–258.
24. Efremov A.N. Arkhitektura matematicheskoi modeli prognozirovaniia kachestva anodno-okisnykh pokrytii na aliuminii i ego splavakh [Architecture of mathematical model for predicting the quality of anodic-oxide coatings on aluminum and its alloys]. *Evrasiiskii soiuz uchenykh. Seriia: Tekhnicheskii i fiziko-matematicheskii nauki*, 2022, no. 1, no. 10(103), pp. 6–13. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1730
25. Efremov A.N. Matematicheskaiia model' prognozirovaniia tolshchiny anodno-okisnogo pokrytiia na aliuminievom splave AMg6 [Mathematical model for predicting the thickness of anodic-oxide coating on aluminum alloy AMg6]. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antei»*, 2023, no. 2, pp. 66–80. DOI: 10.38013/2542-0542-2023-2-66-80
26. Prokhorov A., Lysachev M. Tsifirovoi dvoinik. Analiz, trendy, mirovoi opyt [Analysis, trends, global experience]. Moscow: OOO «Al'iansPrint», 2020, 401 p.

Поступила: 29.12.2023

Одобрена: 12.01.2024

Принята к публикации: 13.05.2024

## Об авторе

**Ефремов Андрей Николаевич** (Екатеринбург, Российская Федерация) – аспирант, начальник бюро (технического контроля), ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (Российская Федерация, 620091, г. Екатеринбург, пр-кт Космонавтов, стр. 18, e-mail: andrey\_effremuss@mail.ru).

## About the author

**Andrey N. Yefremov** (Yekaterinburg, Russian Federation) – postgraduate, head of the bureau (technical control), PJSC «Machine-Building Plant named after M.I. Kalinin, Yekaterinburg» (18, Kosmonavtov Ave., Yekaterinburg, 620091, Russian Federation, e-mail: andrey\_effremuss@mail.ru).

## Финансирование.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.