

УДК 621.357.2

## ДИАГНОСТИКА РАСТРАВА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДОГО АНОДИРОВАНИЯ

Д. М. ЛАЗАРЕВ<sup>1</sup>, А. Р. ФАТКУЛЛИН<sup>2</sup>, Р. Г. ФАРРАХОВ<sup>3</sup>,  
Ф. К. ЯППАРОВ<sup>4</sup>, Е. В. ПАРФЕНОВ<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> denis\_rb84@mail.ru, <sup>2</sup> checkmate2007@yandex.ru, <sup>3</sup> frg1982@mail.ru, <sup>4</sup> fanis500@yandex.ru, <sup>5</sup> evparfenov@mail.ru

<sup>1,2,3,4,5</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

<sup>6</sup> ГБНУ «Академия наук Республики Башкортостан» (АН РБ)

*Поступила в редакцию 31.03.2023*

**Аннотация.** Работа посвящена решению задачи диагностики растрова оксидных покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах, в процессе твердого анодирования. Проблема диагностики растрова решена на основе анализа динамики изменения напряжения в ходе обработки. Предложена феноменологическая модель процесса твердого анодирования с ростом и растравом оксидного покрытия. На основе феноменологической модели разработаны способы диагностики внезапного и системного растравов, обеспечивающие автоматический останов процесса твердого анодирования в случае детектирования растрова.

**Ключевые слова:** твердое анодирование; алюминиевый сплав; автоматизированная технологическая установка; плотность тока; диагностика растрова.

### ВВЕДЕНИЕ

Авиационная промышленность предъявляет достаточно высокие требования к выпускаемым изделиям из различных металлов и их сплавов [1]. К ним относятся алюминиевые сплавы, которые широко используются, например, при изготовлении ответственных деталей вертолетов [2]. Поверхностный слой таких деталей, как правило, нуждается в модификации оксидным покрытием с целью упрочнения и защиты от коррозии и эрозии [3–6]. Одной из известных электрохимических технологий модификации поверхностного слоя металлов и сплавов является твердое анодирование (ТА) [7–13]. ТА представляет собой процесс формирования защитных покрытий, соответствующих ГОСТ 9.305-84 по износо- и коррозионной стойкости, на деталях из алюминиевых сплавов при их анодной поляризации [7–13]. Данный процесс реализуется в ванне-электролизере, заполненной охлажденным до отрицательных температур сернокислым электролитом, в который помещена обрабатываемая деталь [7–13].

Модификация поверхности деталей из алюминиевых сплавов методом твердого анодирования широко применяется на многих предприятиях авиационной отрасли. К таким предприятиям относится АО «КумАПП» (г. Кумертау), в гальваническом цеху которого методом ТА наносятся покрытия типа Ан.Окс.тв. на детали из сплавов АК6, АК7ч и Д16Т с помощью автоматизированной технологической установки с компьютерным управлением и диагностикой толщины покрытия, конструкция которой рассмотрена в работах [14, 15]. В данной установке, функционирующей в условиях серийного производства деталей вертолетов, реализовано про-

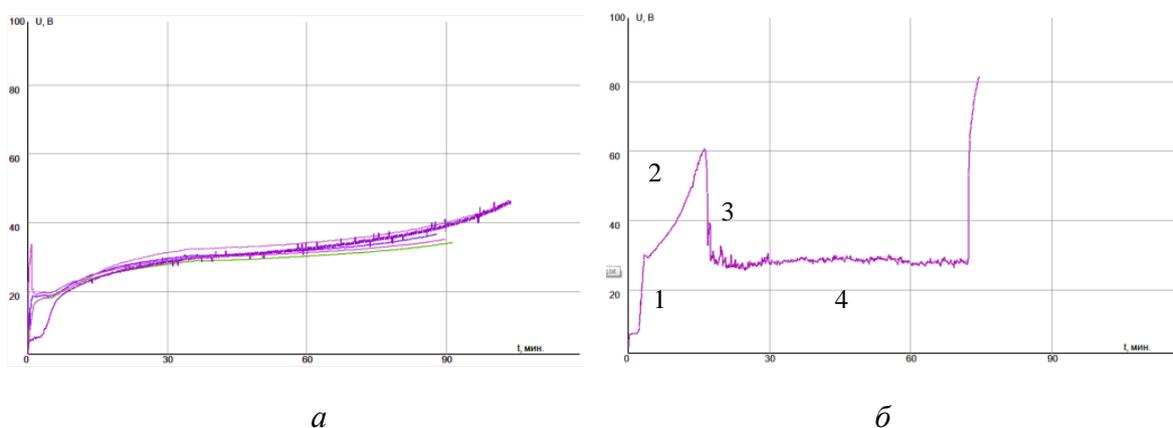
граммное управление плотностью тока в процессе твердого анодирования с модулем автоматической диагностики толщины покрытия, позволяющим останавливать процесс при достижении заданной толщины покрытия.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что в процессе твердого анодирования алюминиевых сплавов, особенно содержащих медь, в растворе серной кислоты может образовываться растравленное оксидное покрытие [7–9]. Это происходит потому, что на оксидном покрытии осаждается медь, накапливающаяся в электролите в ходе обработки. При несвоевременном прекращении процесса ТА растравливание покрытия приводит к отсеву бракованной детали в целом. Поэтому для предотвращения появления брака важным условием качественного нанесения защитных покрытий на алюминиевые сплавы в процессе ТА является своевременное предупреждение и диагностика растравливания оксидного покрытия. В связи с этим возникает необходимость создания автоматического модуля, обеспечивающего детектирование и диагностику растравливания покрытия по результатам измерения и анализа информативных параметров, характеризующих растрав, в процессе твердого анодирования.

Анализ работ [7–9] показал, что при нормальном протекании процесса ТА в режиме постоянной плотности тока с ростом покрытия происходит монотонное возрастание напряжения, а его спад свидетельствует о «пробое» покрытия, который в дальнейшем приводит к растраву детали. Таким образом, одним из путей получения информации о растравливании оксидного покрытия является исследование динамики изменения напряжения в процессе твердого анодирования.

На рис. 1 показаны кривые изменения напряжения, полученные в ходе экспериментальных исследований процесса ТА в гальваническом цеху АО «КумАПП», при росте (а) и растраве (б) оксидных покрытий.



**Рис. 1.** Динамика изменения напряжения при росте (а) и растраве (б) оксидных покрытий в ходе процесса твердого анодирования

Анализ рис. 1, а показывает, что для различных реализаций процесса с ростом покрытий наблюдается монотонное возрастание напряжения при постоянной плотности тока. Анализ рис. 1, б показывает, что после увеличения (участки 1 и 2) напряжение резко падает (участок 3) на величину более 20 В за время менее 1 минуты с последующей его стабилизацией (участок 4) на уровне 25÷35 В. Поскольку твердое анодирование проводится при постоянном токе, то спад напряжения указывает на уменьшение толщины и сопротивления покрытия в следствие его электрического пробоя, а дальнейшая стабилизация напряжения свидетельствует о прекращении роста покрытия и неизменном значении его сопротивления. При таких условиях возникает растрав покрытия и, как следствие, растравливание материала детали. Подобное

протекание процесса твердого анодирования нежелательно и поэтому его следует сразу прерывать при резком спаде напряжения.

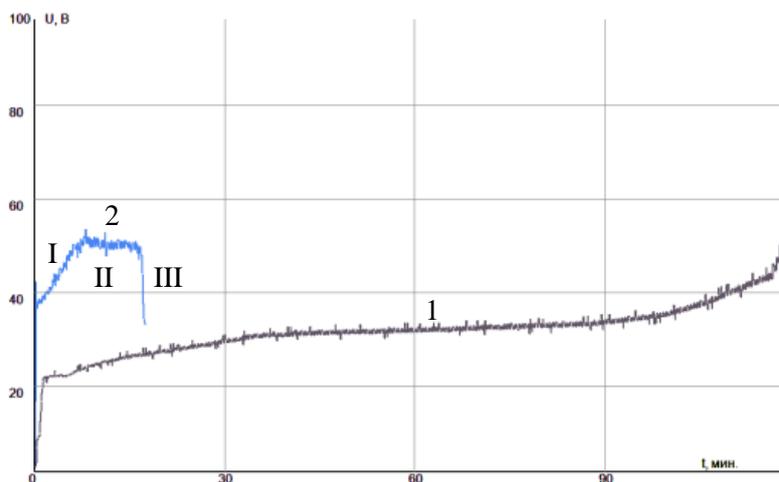
Таким образом, целью настоящей работы является разработка феноменологической модели процесса твердого анодирования и решение задачи диагностики растрыва оксидных покрытий на основе анализа динамики изменения напряжения в ходе обработки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для решения поставленной задачи проводились экспериментальные исследования процесса твердого анодирования с провоцированием растрыва с помощью автоматизированной технологической установки с компьютерным управлением и диагностикой толщины покрытия [14].

Для исследования использовались образцы из сплава Д16Т, изготовленные в форме уголка размером 30х30х80 мм и пластины размером 430х300 мм. Площадь уголка составляла 0,96 дм<sup>2</sup>, пластины – 25,8 дм<sup>2</sup>. Исследуемые образцы одновременно подвешивали на анодной штанге с помощью подвесочных приспособлений и обеспечивали обычный контакт подвеса-струбцины с образцом в форме пластины и тугий качественный контакт с образцом в форме уголка. Твердое анодирование проводили при постоянной плотности тока в разбавленном серноокислом электролите, охлажденном до температур –4...–7 °С. В ходе экспериментов контролировали динамику изменения напряжения обработки. Экспериментальные исследования проводили в два этапа. На первом этапе при нормальном протекании процесса в течение 120 минут на образцах формировали оксидные покрытия, и затем процесс останавливали. На втором этапе с целью провоцирования растрыва на этих же образцах продолжали формировать покрытия и процесс останавливали при снижении напряжения на величину порядка 20 В. После твердого анодирования проводили визуальный осмотр и анализ внешнего вида используемых образцов.

На рис. 2 показаны примеры кривых изменения напряжения при росте (1) и растрыве (2) покрытий, полученные в ходе экспериментального исследования процесса твердого анодирования.

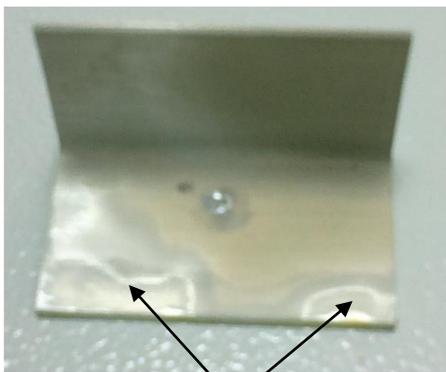


**Рис. 2.** Примеры кривых изменения напряжения при росте (1) и растрыве (2) покрытий в ходе экспериментального исследования процесса твердого анодирования

Анализ кривой 1 (рис. 2) показывает, что при нормальном протекании процесса твердого анодирования наблюдается монотонный рост напряжения, обусловленный ростом покрытия на обоих образцах. При этом максимальное напряжение соответствует максимальной толщине покрытия. Анализ кривой 2 (рис. 2) показывает, что в первые 10 мин (участок I) наблюдается рост напряжения, что связано с дальнейшим ростом покрытия на обоих образцах. Затем напря

жение незначительно спадает и стабилизируется (участок II), что свидетельствует о прекращении роста покрытия на обоих образцах. Далее после стабилизации напряжение резко спадает (участок III) на величину порядка 20 В, что свидетельствует о начале растравливания покрытия одного или обоих образцов.

Визуальный осмотр и анализ внешнего вида образцов после проведенных экспериментальных исследований показал, что на уголке наблюдаются растравленные участки покрытия и металла (рис. 3). На пластине подобные участки не были обнаружены.



Растравленные участки покрытия и металла

**Рис. 3.** Фотография уголка после экспериментальных исследований процесса твердого анодирования с провоцированием растрва

Поврежденные участки на уголке объясняются особенностью механизма растравливания в процессе твердого анодирования, который заключается в следующем. Поскольку площадь пластины больше площади уголка, то при нормальном протекании процесса (рис. 2, кривая 1) на пластине формируется покрытие большей толщины и большего сопротивления, чем на уголке. При продолжении процесса твердого анодирования (рис. 2, кривая 2) пластина фактически изолирована толстым покрытием от электролита. При этом, поскольку оба образца включены параллельно и общая площадь загрузки между ними распределена неравномерно, то плотность тока автоматически перераспределяется с пластины с большей площадью на уголок с меньшей площадью. В результате сосредоточенная на уголке плотность тока возрастает в несколько раз, сдвигая равновесие электрохимических реакций выхода ионов алюминия в раствор и окисления их выделяющимся на аноде кислородом в сторону растворения, что в итоге приводит к растравливанию покрытия и металла.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что в процессе твердого анодирования происходит растравливание того образца, который имеет меньшую площадь и лучший контакт с подвесочным приспособлением.

### **ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТВЕРДОГО АНОДИРОВАНИЯ**

На основе анализа полученных результатов исследования предложена феноменологическая модель процесса твердого анодирования (рис. 4), проводимого при постоянной плотности тока. Данная модель описывает основные явления и процессы, происходящие в системе «рабочий электрод–поверхностный слой–электролит–противоэлектрод» при росте и растрове покрытия.

Рассмотрим процессы, происходящие при росте покрытия в ходе твердого анодирования. На противоэлектроде протекают катодные электрохимические процессы, сопровождающиеся выделением водорода. На рабочем электроде протекают анодные электрохимические процессы растворения и окисления материала детали. При этом оба электрода имеют электронную проводимость и соответствующее активное сопротивление.

В электролите протекают процессы образования анионов и катионов, обуславливающие его ионную проводимость и активное сопротивление. Данные процессы сопровождаются значительным выделением теплоты у основания пор формируемой оксидной пленки, заполненных электролитом, что обуславливает необходимость использования контура теплообмена для поддержания необходимой отрицательной температуры электролита в заданных пределах.

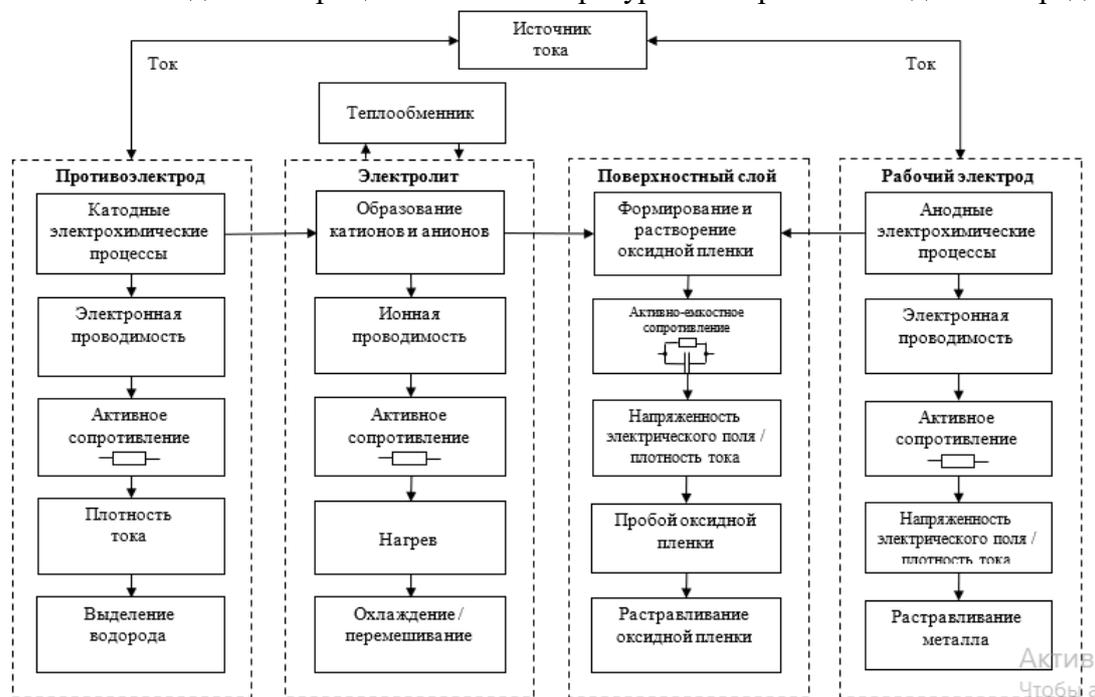


Рис. 4. Феноменологическая модель процесса твердого анодирования

В поверхностном слое протекают процессы формирования оксидной пленки, имеющей высокое активно-емкостное сопротивление, значительно превышающее сопротивления электролита и электродов. Формирующаяся оксидная пленка взаимодействует с электролитом и частично растворяется за счет гидратации ионов алюминия с молекулами воды и сульфат-анионами кислоты. При этом предельная толщина покрытия достигается при выравнивании скорости процессов формирования и растворения оксидной пленки.

Рассмотрим явления, происходящие при растрове в ходе процесса твердого анодирования. Внезапный или быстрый растрав возникает на конечных стадиях процесса при толщине оксидной пленки более 30 мкм и напряжении более 40 В [15]. При таких условиях в менее толстом оксидном слое детали наименьшего размера сосредотачивается наибольшая напряженность электрического поля, приводящая к пробое оксидной пленки. В результате на поврежденные участки оксидной пленки с наименьшим сопротивлением устремляется весь ток источника, предназначенный для всей детали, что приводит к резкому повышению локальной плотности тока и появлению локальных растравленных участков покрытия, которые не компенсируются постоянным током, подводимым к детали. При подобном протекании процесса площадь растравленных участков покрытия увеличивается, что в итоге приводит к растравливанию материала детали. Поскольку процесс проводится при постоянном токе, то данный тип растрова характеризуется резким спадом напряжения.

Системный или медленный растрав возникает, как правило, на начальных стадиях процесса, когда прекращается рост оксидной пленки [15]. В таких условиях при повышении плотности тока на рабочем электроде протекают процессы анодного растворения материала детали. Поэтому данный тип растрова характеризуется прекращением роста напряжения или его плавным спадом.

Таким образом, структурирование явлений и процессов с помощью феноменологической модели позволяет разработать способы диагностики внезапного и системного растратов оксидного покрытия в ходе твердого анодирования.

### ДИАГНОСТИКА РАСТРАВА ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ

На основе предложенной феноменологической модели и по результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что растрав оксидного покрытия можно детектировать и диагностировать по динамике изменения напряжения в ходе процесса твердого анодирования.

При разработке способа диагностики растрова для каждого сплава строились эталонные и реальные кривые напряжения (рис. 5 и 6), рассчитываемые по регрессионной модели [15]:

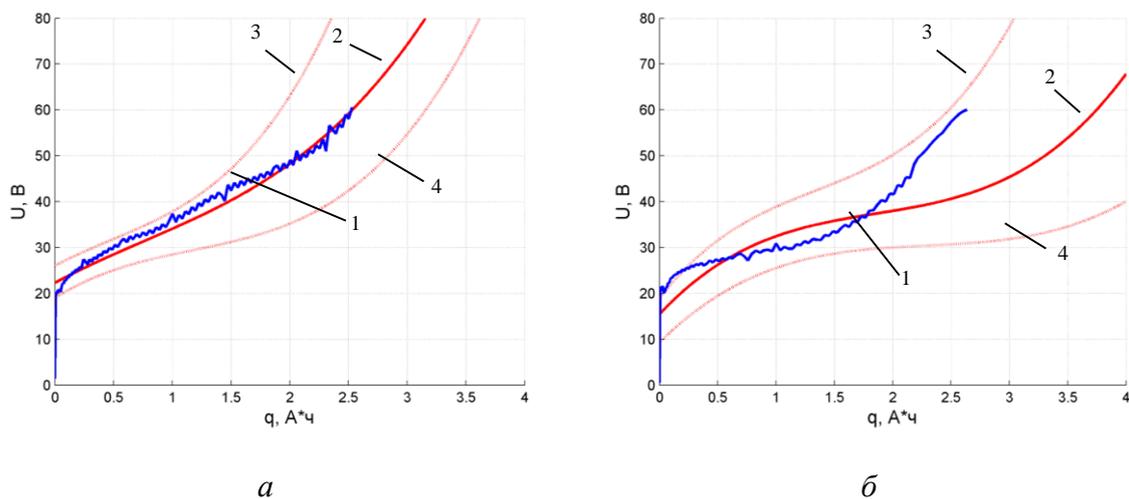
$$U = U_0 + b_1 q + b_2 q^2 \quad (1)$$

где  $U_0$  – значение начального напряжения;  $b_1$  и  $b_2$  – коэффициенты регрессии фактора;  $q$  – удельное количество электричества.

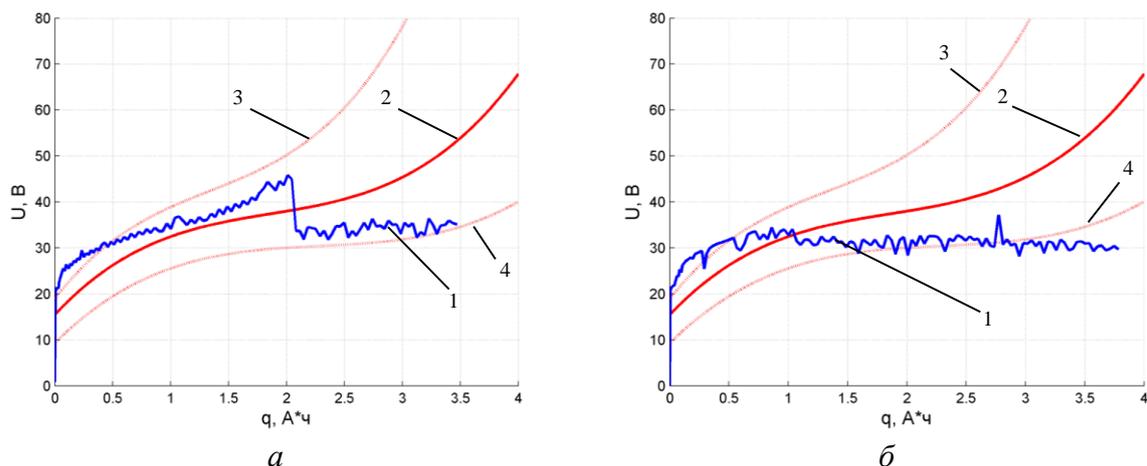
Анализ рис. 5 показывает, что при нормальном протекании процесса твердого анодирования с ростом покрытия реальная кривая напряжения монотонно возрастает в пределах коридора, определяемого анодируемым сплавом. При протекании процесса с внезапным растравом покрытия (рис. 6, а) реальная кривая напряжения после роста резко падает на величину более 20 В за 1...2 с. При системном растраве (рис. 6, б) наблюдается прекращение роста реальной кривой напряжения и ее дальнейший незначительный спад.

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что процесс растравливания оксидного покрытия может быть как внезапным, так и системным. При этом отличаются условия возникновения данных типов растрова и их электрические характеристики. Указанные особенности обуславливают необходимость разработки двух различных способов диагностики растрова.

По результатам анализа динамики изменения напряжения предложено два алгоритма диагностики внезапного растрова: 1) на основе расчета производной текущего значения напряжения  $dU/dt$ ; 2) на основе расчета разности напряжения  $\Delta U$ .



**Рис. 5.** Реальные (1) и эталонные (2) кривые напряжения, верхняя (3) и нижняя (4) границы коридора нормального роста напряжения в процессе твердого анодирования сплавов АК6 (а) и Д16Т (б)



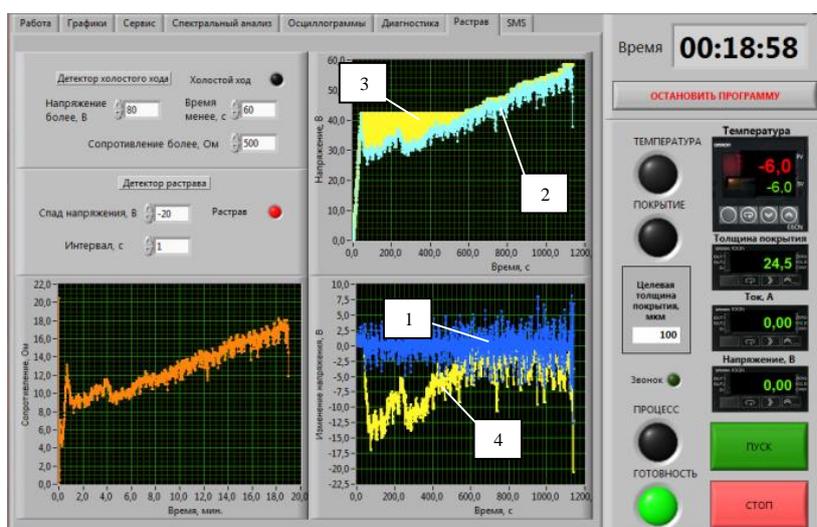
**Рис. 6.** Реальные кривые напряжения (1), характерные для внезапного (а) и системного (б) растрова покрытия, и эталонные кривые напряжения (2), характерные для роста покрытия, а также верхняя (3) и нижняя (4) границы коридора нормального роста напряжения в процессе твердого анодирования сплава Д16Т

Алгоритм диагностики внезапного растрова, основанный на расчете производной текущего значения напряжения, программно реализован в АСУ ТП твердого анодирования (рис. 7). Анализ рис. 7 показывает, что график оценки производной  $dU/dt$  (кривая 1) сильно зашумлен, поскольку зашумлен график текущего значения напряжения  $U(t)$  (кривая 2). Это связано с тем, что случайные колебания текущего напряжения порождают случайные колебания производной. В результате на фоне колебаний производной пик, связанный со спадом напряжения, не детектируется.

Проверка работоспособности и опытная эксплуатация показала низкую эффективность и помехозащищенность алгоритма диагностики внезапного растрова на основе расчета производной текущего значения напряжения в составе АСУ ТП.

Алгоритм диагностики внезапного растрова, основанный на расчете разности напряжения, также программно реализован в АСУ ТП твердого анодирования (рис. 7). В ходе процесса твердого анодирования программа диагностики в каждый момент времени рассчитывает разность напряжения  $\Delta U$  (кривая 4) между максимально достигнутым напряжением  $\max(U)$  (кривая 3) и текущим значением напряжения  $U(t)$  (кривая 2) по формуле:

$$\Delta U = \max(U) - U(t) \quad (2)$$



**Рис. 7.** Реализация способа диагностики внезапного растрова в АСУ ТП твердого анодирования: 1 – оценка производной  $dU/dt$ ; 2 – текущее напряжение  $U(t)$ ; 3 – максимально достигнутое напряжение  $\max(U)$ ; 4 – разность напряжения  $\Delta U$

При превышении разности напряжения  $\Delta U$  порогового значения  $U_{\Pi}$  программа диагностики детектирует внезапный растрав и автоматически останавливает процесс твердого анодирования. В случае детектирования внезапного растрava загорается сигнализирующий красный индикатор «Растрав» на соответствующей вкладке (рис. 7) и на лицевой панели АСУ ТП твердого анодирования (рис. 8). При этом оператор оповещается об окончании процесса по причине внезапного растрava с помощью СМС сообщения.

Проверка работоспособности и опытная эксплуатация показала высокую эффективность и помехозащищенность алгоритма диагностики внезапного растрava на основе расчета разности напряжения в составе АСУ ТП.

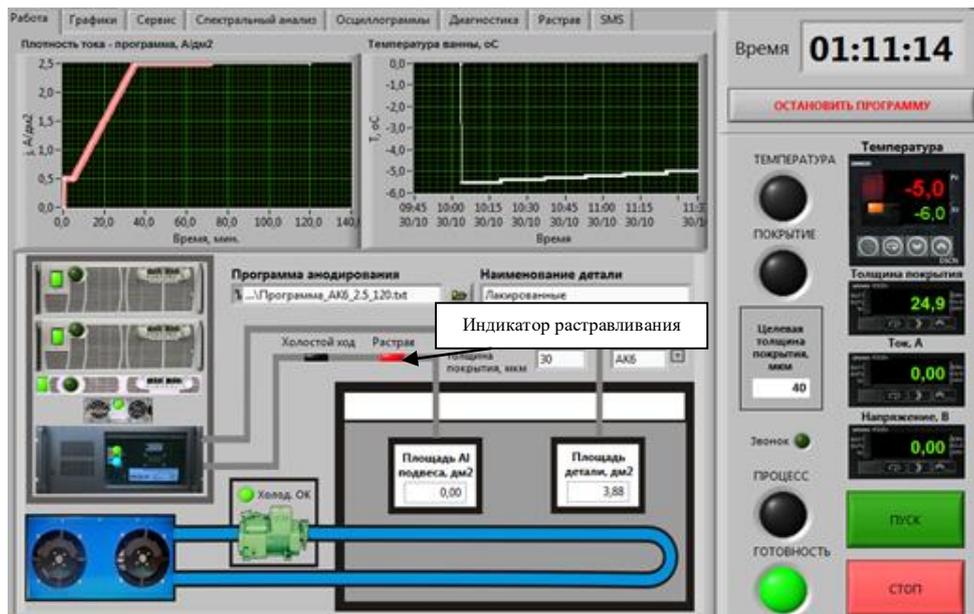


Рис. 8. Лицевая панель АСУ ТП твердого анодирования в случае детектирования внезапного растрava

По результатам анализа динамики изменения напряжения для решения задачи диагностики системного растрava предложен алгоритм, основанный на детектировании прекращения роста напряжения. Алгоритм диагностики системного растрava программно реализован в АСУ ТП твердого анодирования (рис. 9). Программа диагностики рассчитывает коридор нормального роста напряжения при росте покрытия по регрессионной модели вида (1). При выходе текущего значения напряжения за нижнюю границу коридора программа диагностики детектирует системный растрав и автоматически останавливает процесс твердого анодирования.

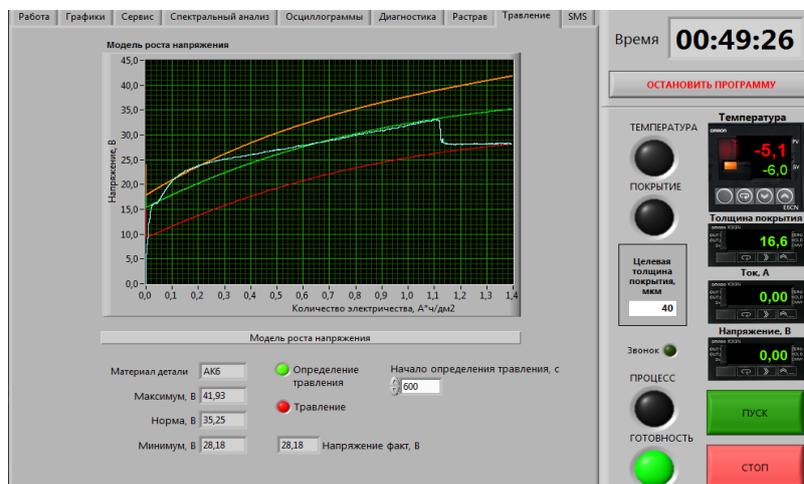


Рис. 9. Реализация способа диагностики системного растрava в АСУ ТП твердого анодирования

В случае детектирования системного растрова загорается сигнализирующий красный индикатор «Травление» на вкладке, изображенной на рис. 9. При этом оператор также оповещается об окончании процесса по причине системного растрова с помощью СМС сообщения.

Проверка работоспособности и опытная эксплуатация показала высокую эффективность и помехозащищенность алгоритма диагностики системного растрова в составе АСУ ТП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложено решение задачи диагностики растрова оксидных покрытий на алюминиевых сплавах на основе анализа динамики изменения напряжения в процессе твердого анодирования.

По результатам экспериментально установленных условий возникновения и электрических характеристик предложена феноменологическая модель процесса твердого анодирования с ростом и растравом оксидного покрытия. На основе феноменологической модели разработаны способы диагностики: 1) внезапного растрова на основе расчета разности между максимально достигнутым и текущим значением напряжения; 2) системного растрова на основе расчета коридора нормального роста напряжения при росте покрытия.

Разработанные способы позволяют диагностировать внезапный и системный растравы с точностью порядка 95% и реализованы в АСУ ТП твердого анодирования гальванического цеха АО «КумАПП» в условиях серийного производства ответственных деталей вертолетов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Климов В. Н.** Современные авиационные конструкционные сплавы: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 40 с. [V. N. Klimov Modern aviation structural alloys: textbook allowance, (in Russian), Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017.]
2. **Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А.** Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 195-211. [V. V. Antipov, Yu.Yu. Klochkova, V.A. Romanenko Modern aluminum and aluminum-lithium alloys, (in Russian), in Aviatsonnyye materialy i tekhnologii, no. 5, pp. 195-211, 2017.]
3. **Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Артемьев В.П.** Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // Цветные металлы. 2009. № 10. С. 57-61. [O. E. Chufistov, E. A. Chufistov, V. P. Artemiev Technology, structure and properties of coatings formed by anodic oxidation on aluminum and its alloys, (in Russian), in Tsvetnyye metally, no. 10, pp. 57-61, 2009.]
4. **Каримова С.А., Чесноков Д.В.** Перспективные технологии для защиты от коррозии и ремонта авиационной техники // Новости материаловедения. 2013. № 4. С. 1-11. [S. A. Karimova, D. V. Chesnokov Promising technologies for corrosion protection and repair of aviation equipment, (in Russian), in Novosti materialovedeniya, no. 4, pp. 1-11, 2013.]
5. **Курс М.Г., Каримова С.А.** Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 51-57. [M. G. Course, S. A. Karimova Full-scale accelerated tests: features of the methodology and methods for assessing the corrosion characteristics of aluminum alloys, (in Russian), in Aviatsonnyye materialy i tekhnologii, no. 1, pp. 51-57, 2014.]
6. **Павловская Т.Г., Козлов И.А., Волков И.А. и др.** Формирование твердых износостойких анодно-оксидных покрытий на деталях из литейных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2015. № 8. С. 30-35. [T. G. Pavlovskaya, I. A. Kozlov, I. A. Volkov et al. Formation of hard wear-resistant anodic oxide coatings on parts made of cast aluminum alloys, (in Russian), in Trudy VIAM, no. 8, pp. 30-35, 2015.]
7. **Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П.** Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение, 1968. 156 с. [N. D. Tomashov, M. N. Tyukina, F. P. Zalivalov Thick-layer anodizing of aluminum and its alloys, (in Russian), Moscow: Mashinostroenie, 1968.]
8. **Хенли В.Ф.** Анодное оксидирование алюминия и его сплавов / Пер. с англ. Под ред. Синявского В.С. М.: Metallurgia, 1986. 152 с. [V. F. Henley Anodic oxidation of aluminum and its alloys / Per. from eng. Ed. Sinyavsky V.S., Moscow: Metallurgia, 1986.]
9. **Аверьянов Е.Е.** Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с. [E. E. Averyanov Anodizing Handbook, (in Russian), Moscow, Mashinostroenie, 1988.]
10. **Скопинцев В.Д.** Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 120 с. [V. D. Skopintsev Oxidation of aluminum and its alloys, (in Russian), Moscow: RKHTU im. D.I. Mendeleeva, 2015.]
11. **Bononi M., Conte M., Giovanardi R., Bozza A.** Hard anodizing of AA2099-T8 aluminum lithium copper alloy: Influence of electric cycle, electrolytic bath composition and temperature // Surface & Coatings Technology. 2017. Vol. 325. P. 627-635.
12. **Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С. и др.** Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 8. С. 79-89. [V. A. Duyunova, I. A. Kozlov, M. S. Oglodkov et al Modern trends in anodic oxidation of aluminum-lithium and aluminum alloys (review), (in Russian), in Trudy VIAM, no. 8, pp. 79-89, 2019.]

13. Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Развитие технологии анодного оксидирования алюминия и его сплавов // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27, № 2. С. 9-22 [V. D. Skopintsev, L. N. Margolin, V. V. Farafonov Development of technology for anodic oxidation of aluminum and its alloys, (in Russian), in Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti, vol. 27, no. 2, pp. 9-22, 2019.]

14. Парфенов Е.В., Фаткуллин А.Р., Лазарев Д.М. и др. Автоматизированная технологическая установка твердого анодирования деталей вертолетов с диагностикой толщины покрытия // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 3 (64). С. 73-79. [E. V. Parfenov, A. R. Fatkullin, D. M. Lazarev et al. Automated technological equipment for hard anodizing of helicopter parts with coating thickness diagnostics, (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 18, no. 3 (64), pp. 73-79, 2014.]

15. Лазарев Д.М., Фаткуллин А.Р., Парфенов Е.В. и др. Автоматизация ТП твердого анодирования алюминиевых сплавов с диагностикой толщины покрытия и растрыва поверхности // Автоматизация в промышленности. 2016. С. 39-43. [D. M. Lazarev, A. R. Fatkullin, E. V. Parfenov et al. Automation of TP of hard anodizing of aluminum alloys with diagnostics of coating thickness and surface etching, (in Russian), in Automation in industry, pp. 39-43, 2016.]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЛАЗАРЕВ Денис Михайлович**, ст. преп. каф. ЭЛИ. Дипл. инж. по авиац. приб. и изм.-выч. компл. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по автом. и упр. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. автоматиз. управл. технол. процессов.

**ФАТКУЛЛИН Азамат Раисович**, доц. каф. ЕНиОТД (филиал в г. Кумертау). Дипл. инж. по авиац. приб. и изм.-выч. компл. (УГАТУ, 2007). Канд. техн. наук по автом. и упр. технол. проц. и произв. (Оренбургск. гос. ун-т, 2016). Иссл. в обл. автоматизац. электрохим. процессов.

**ФАРРАХОВ Рузиль Галиевич**, доц. каф. ЭЛИ. Дипл. инженер-механик (Уфимск. гос. ин-т сервиса, 2004). Канд. техн. наук по информ.-измерит. и управл. системам (Астраханск. гос. ун-т, 2007). Иссл. в обл. электротехнолог. процессов.

**ЯППАРОВ Фанис Камилевич**, преп. отд. СПО АТК (филиал в г. Кумертау). Дипл. инж. по оборуд. и технол. повыш. износостойк. и восстан. дет. маш. и аппар. (ОГУ, 2003). Иссл. в обл. трибол. и функционал. Покрытий.

**ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович**, зав. каф. МиФМ УУНиТ, проф. АН РБ. Дипл. инж. по пром. электрон. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по автом. и упр. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. моделирования, диагностики и управления электрохим. технол. проц.

#### METADATA

**Title:** Diagnostics of etching of oxide coatings on aluminum alloys in the process of hard anodizing.

**Authors:** D. M. Lazarev<sup>1</sup>, A. R. Fatkullin<sup>2</sup>, R. G. Farrakhov<sup>3</sup>, F. K. Yapparov<sup>4</sup>, E. V. Parfenov<sup>5,6</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

<sup>6</sup> Academy of Sciences of Republic of Bashkortostan, Russia.

**Email:** <sup>1</sup> denis\_rb84@mail.ru, <sup>2</sup> checkmate2007@yandex.ru, <sup>3</sup> frg1982@mail.ru, <sup>4</sup> fanis500@yandex.ru, <sup>5,6</sup> evparfenov@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 2 (100), pp. 82-91, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The work is devoted to solving the problem of diagnosing the etching of oxide coatings formed on aluminum alloys in the process of hard anodizing. The problem of raster diagnostics is solved based on the analysis of the dynamics of voltage changes during processing. A phenomenological model of the hard anodizing process with oxide coating growth and etching is proposed. On the basis of a phenomenological model, methods have been developed for diagnosing sudden and systemic etching, which provide automatic shutdown of the hard anodizing process in the event of etching detection.

**Key words:** hard anodizing; aluminum alloy; automated technological equipment; current density; etching diagnostics.

**About authors:**

**LAZAREV, Denis Mikhailovich**, Senior Lecturer, Dept. of Electronic Engineering. Dipl. Eng. in Aviation Instruments and Information Complexes (USATU, 2006). PhD. in Tech. Sci. (USATU, 2013).

**FATKULLIN, Azamat Raisovich**, Associate prof., Dept. of General Science and Engineering (Kumertau campus). Dipl. Eng. in Aviation Instruments and Information Complexes (USATU, 2007). PhD. in Tech. Sci. (OSU, 2016).

**FARRAKHOV, Ruzil Galievich**, Associate prof., Dept. of Electronic Engineering. Dipl. Engineer- mechanic (UGIS, 2004), PhD. in Tech. Sci. (Astrakhan State University, 2007).

**YAPPAROV, Fanis Kamilovich**, Lecturer, Dept. of Secondary Vocational Education Aviation Technical College (Kumertau campus). Dipl. Eng. In Equipment and Technology for Increasing Wear Resistance and Restoring Parts of Machines and Apparatus (OSU, 2003).

**PARFENOV, Evgeny Vladimirovich**, Prof., Head of Department of Materials Science and Physics of Metals. Prof. Acad. Sci. Rep. Bashkortostan. Dipl. Eng. in Industrial Electronics (USATU, 1997). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2012).