

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Чжао Цзыдун

Исследование влияния модификации поверхность на циклическую
прочность алюминиевых сплавов

Направление подготовки 15.04.03 - «Прикладная механика»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

докт. техн. наук, доцент
Башков Олег Викторович

Защита состоится «28» июня 2023 года в 9 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202

Автореферат разослан 24 июня 2023 г.

Секретарь ГЭК

Бурдасова Александра Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Микродуговое оксидирование – это технология обработки поверхности с меньшим загрязнением, которая позволяет создавать твердый керамический слой на поверхности цветных металлов вентильной группы, что может значительно изменить не только комплексные характеристики поверхности металла, но и комплексные характеристики всего изделия.

Однако из-за микроскопических дефектов в керамическом слое, сформированном при микродуговом оксидировании, усталостные характеристики металлической подложки могут быть снижены. Усталостные характеристики металлических материалов являются важным параметром при проектировании конструкций, поэтому необходимо изучить влияние керамического слоя при микродуговом оксидировании на усталостные характеристики алюминиевого сплава.

Целью работы является изучение влияния концентрации метасиликата натрия в электролите на параметры полученного оксидного покрытия, формируемого на алюминиевом сплаве методом микродугового оксидирования.

Основные задачи исследования:

- 1) Выполнить аналитический обзор в области микродугового оксидирования алюминиевых сплавов
- 2) Выполнить выбор электролита для формирования оксидных покрытий на алюминиевых сплавах
- 3) Выполнить микродуговое оксидирование образцов с различным содержанием электролита
- 4) Выполнить анализ поверхности и характер нанесения покрытий
- 5) Провести испытания на усталость образцов с оксидными покрытиями и выполнить анализ влияния содержания электролита и режимов оксидирования на усталостное разрушение образцов.

Объектом исследования В качестве исследуемого материала выбрана алюминиевый сплав Д16. Для всех образцов было выполнено микродуговое

оксидирование. Циклическое испытание алюминиевого сплава с полученными оксидными покрытиями позволяет исследование влияния их на усталость подложки из алюминиевого сплава.

Предметом исследования являются морфология, структура и механические свойства оксидного покрытия, формируемого при различном режиме МДО.

Методы исследования. Основаны на усталостное разрушение алюминиевого сплава с оксидным покрытием, формируемым методом микродугового оксидирования. Оксидирование выполняло при плотности тока $4,4 \text{ А/дм}^2$ в электролите с различными концентрациями составами Na_2SiO_3 . Температура электролита в процессе оксидирования не превышала 30°C . После формирования оксидного покрытия толщина и шероховатости были измерены с помощью оптического микроскопа и измерителем TR200. Испытание на усталость было приведено на лабораторной установке с бесшумными и бесконтактными электромагнитными нагрузками при циклическом напряжении 250 Мпа . В процессе циклического испытания одновременно регистрировал сигналы акустической эмиссии с использованием аналого-цифровой преобразователи Adlinktech 9812 и преобразователя АЭ.

Научная новизна:

Установление зависимости качества полученного оксидного покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, от режимов оксидирования. Полученные зависимости позволяют предложение рекомендаций по выбору оптимального режима МДО для получения заданных качества оксидного покрытия и внести вклад в развитии технологию МДО.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Экспериментальные исследования проведены с использованием современного оборудования. Подготовка и испытания образцов проведены согласно стандартам. Определение структурных показателей и механических свойств изученного материала проводилось с применением апробированных методик и оборудования.

Практическая значимость и ценность работы

Практическая значимость работы заключается в получении результата – морфология, структуры и качество оксидного покрытия, формируемого при различных режимах микродугового оксидирования.

Ценность работы заключается в установлении закономерностей, связывающих время оксидирования, концентрация метасиликата в электролите и показатели качества и морфологии полученного оксидного покрытия.

Личный вклад автора заключается в формулировании цели и задач диссертационной работы, проведении испытаний и структурных исследований, анализе всех экспериментальных данных и формулировании окончательных выводов по полученным результатам.

Структура и объём магистерской диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 64 страниц и включает 21 рисунка, 4 таблиц, список используемой литературы, состоящий из 28 наименований.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы исследования диссертации, сформулирована цель работы и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна.

Первая глава посвящена анализу состояния проблемы исследования.

В первой главе рассмотрены история развития технологии микродугового оксидирования и их применения, также рассмотрены механизмы усталостного разрушения и оценки структурного состояния при циклическом нагружениях методом акустической эмиссии.

Во второй главе описаны методики, позволяющая формировать оксидного покрытия методом микродуговым оксидированием. Обоснован выбор материала алюминиевого сплава Д16, подвергаемые микродуговым воздействием для дальнейшего испытания на усталость.

продолжает разряжаться. Из-за неравномерного распределения покрытия, более тонкое покрытие разрушается при действии импульсов высокого напряжения, образуя более крупные каналы, как наблюдается на образце G10 (рисунок 1.1; в).

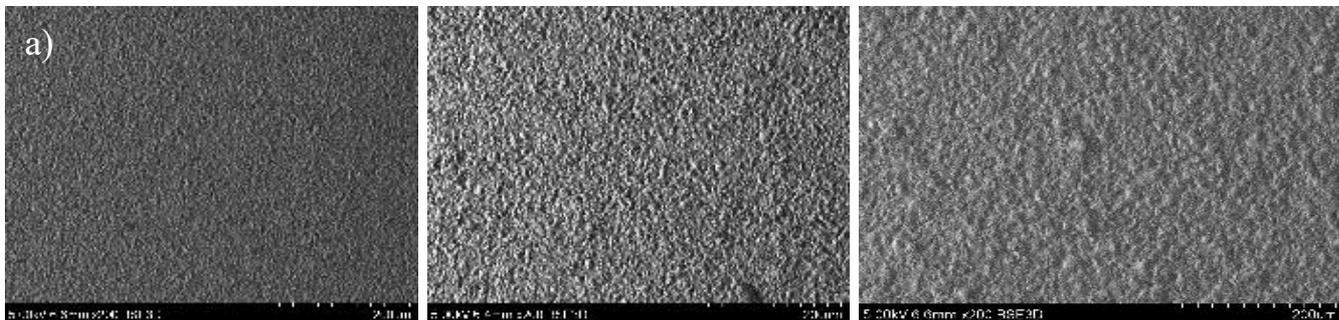


Рисунок 1.2 – Морфология поверхности микродугового оксидирования при разном времени окисления ($\times 200$ BSE):
а – 1 ч; б – 2 ч; в – 3 ч

Из приведенных выше изображений видно (рисунок 1.2), что по мере увеличения времени окисления неравномерность морфологии поверхности увеличивается. Поверхность покрытия образца G9, оксидируемого в течение одного часа (рисунок 1.; а), полученная на BSE режиме, обладает низкой шероховатостью. Однако распределение покрытия неравномерно, в это время происходит вторичный электрический пробой на более тонком покрытии, скорость образования оксида низкая, напряжение возрастает, а окисленный расплав «разбрызгивается» в электролите из этих более крупных каналов. При повышении температуры в каналах скапливается большое количество окисленных расплавов, что увеличивает неравномерность морфологии поверхности.

Комбинацию покрытия и подложки сканировали с помощью электронного микроскопа. Результаты наблюдения представлены (рисунок 1.2). Граница раздела покрытия также подтверждает, что с увеличением времени окисления толщина покрытия также увеличивается. Имеется много разрядов в образце G9 (рисунок 1.2; а). Канал не соединен, но в образце G10 (рисунок 1.2; в) имеется много сквозных отверстий.

Часть пути, отмеченная кружком, представляет собой канал электрического пробоя в слое. Видно, что канал электрического пробоя постепенно.

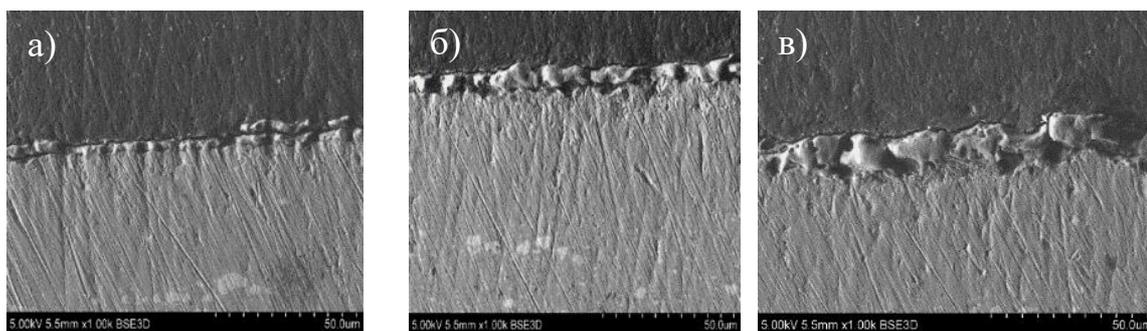


Рисунок 1.3 – Морфология поверхности и каналы электрического пробоя микродугового оксидирования при разном времени окисления ($\times 1000\text{BSE}$):
а – 1 ч; б – 2 ч; в – 3 ч

Толщина покрытия образца G9 (рисунок 1.3; а) 3,56 мкм Толщина покрытия образца G8 (рисунок 1.3; б) 7,03 мкм, толщина покрытия образца G10 (рисунок 1.3; в) 11,12 мкм Часть покрытия отвалилась, что не было вызвано микропроцесс дугового оксидирования, но из-за чрезмерного шлифования наждачной бумагой в процессе полировки вызывает отслаивание покрытия.

Концентрация электролита оказывает большое влияние на характеристики керамического покрытия из алюминиевого сплава с микродуговым оксидированием. Если концентрация мала, твердость, толщина и износостойкость покрытия будут плохими. Если концентрация слишком высока, покрытие станет шероховатым и даже даст много трещин, что повлияет на качество покрытия, поэтому существует разумный диапазон для выбора электролита.

В эксперименте наблюдалось, что на поверхности образца образовывалась темно-серая оксидная пленка, а вокруг образца образовывались пузырьки воздуха. Примерно через 1 мин на краю образца генерируются маленькие серебристо-белые искры, которые распространяются по поверхности образца. В это время рабочим напряжением является напряжение дуги, и оксидная пленка на поверхности образца начинает разрушаться. Массовая концентрация Na_2SiO_3 составляет 15 г/л, 20 г/л и 25 г/л. С увеличением концентрации Na_2SiO_3 напряжение зажигания дуги МДО снижается. Электропроводность электролита линейно возрастает с увеличением концентрации Na_2SiO_3 в электролите. Увеличение проводимости означает, что проводимость электролита повышается, а напряжение, необходимое для пробоя оксидной пленки, также снижается. Из-за неравномерного

распределения электрических силовых линий в разных областях на поверхности образца энергия роста, полученная в краевой области, выше, чем в центральной области, и в первую очередь разрушается слабая оксидная пленка на крае, поэтому искра сначала появляется на краю образца. Через 1 мин кривая зависимости напряжения от времени становится стабильной, а рабочее напряжение изменяется немного выше и ниже напряжения дуги. Пробой оксидной пленки всегда происходит в более тонкой области. В это время область пробоя смещается в центральную область, а серебристо-белые искры на поверхности образца постепенно переходят в ярко-желтые.

При низкой концентрации электролита с содержанием Na_2SiO_3 15 г/л (рисунок 1.4; а), поры в покрытии не больших размеров, а покрытие становится менее шероховатым. Однако, в процессе микродугового оксидирования появляется много трещин. По мере увеличения концентрации электролита микродуговое оксидирование протекает более полно, (рисунок 1.4, б) большая площадь поверхностного керамического слоя плавится и затвердевает вместе.

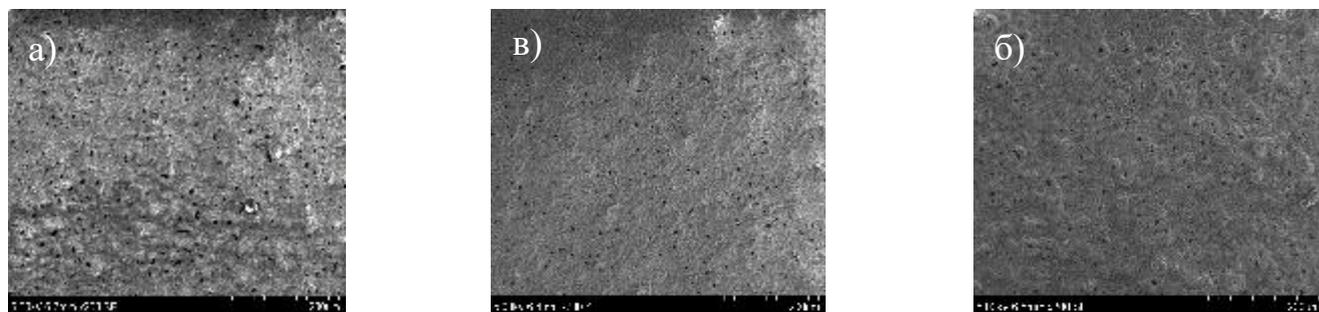


Рисунок 1.4 – Морфология поверхности микродугового оксидирования при различных концентрациях Na_2SiO_3 ($\times 200\text{SE}$):
а - 15г/л, б - 20г/л, в - 25г/л

При слишком высокой концентрации электролита реакция микродугового оксидирования замедляется (рисунок 1.4, в) реакция микродугового окисления протекает с большей энергией, оксидный слой более шероховатый, и образуется больше трещин.

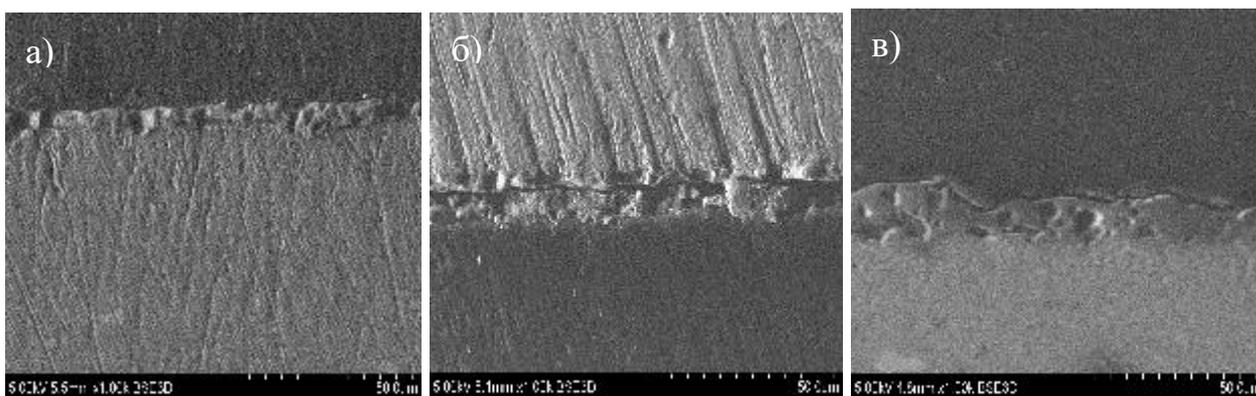


Рисунок 1.5 – Морфология поверхности микродугового оксидирования при различных концентрациях Na_2SiO_3 ($\times 200\text{BSE}$):
а - 15г/л, б - 20г/л, в - 25г/л.

На рисунке 1.5; а, приведены микроструктуры поверхности образцов с покрытием, сформированным при концентрации Na_2SiO_3 15г/л. При увеличении концентрации до 15 г/л (рисунок 1.5, а), толщина покрытия образца G8 составляет 4,25 мкм, а толщина покрытия образца G12 с концентрацией Na_2SiO_3 , равной 20г/л (рисунок 1.5; б) составляет 8,12 мкм. Толщина покрытия образца G6, оксидируемого в электролите с концентрацией 25г/л (рисунок 1.5; в) составляет 12,23 мкм. По мере увеличения концентрации электролита толщина оксидного покрытия увеличивается.

Результаты шероховатости поверхности и толщины покрытия показаны в таблице 1.1. Результаты шероховатости поверхности измеряются три раза для каждого образца и было рассчитано среднее значение. Из таблицы видно, что шероховатость поверхности увеличивается с увеличением времени окисления и плотности электролита. Рисунок 1.6 показывает, что время имеет линейную положительную корреляцию с шероховатостью. Чем больше толщина покрытия, тем большее значение шероховатости оно имеет.

Таблица 1.1-Шероховатость поверхности образцов с покрытие

Условное обозначение образца	Концентрация Na_2SiO_3 (m), г/л	Период оксидирования (t), с	Шероховатость поверхности R_a , мкм
G5	25	10800	1,98
G6	25	7200	1,51
G7	25	3600	0,58
G8	15	7200	0,48
G9	15	3600	0,37
G10	15	10800	1,25
G11	20	10800	1,32
G12	20	7200	0,98
G13	20	3600	0,39

На начальной стадии МДО на поверхности покрытия имеется множество каналов, что способствует попаданию электролита в матрицу, а электролит встречается с расплавленным оксидом алюминия, распыляемым из каналов, и способствует образованию фазы при затвердевании оксид алюминия, который может быть создан на поверхности подложки сжимающее напряжение, тем самым препятствуя зарождению и распространению трещин.

На начальной стадии МДО на поверхности покрытия имеется множество каналов, что способствует попаданию электролита в матрицу, а электролит встречается с расплавленным оксидом алюминия, распыляемым из каналов, и способствует образованию фазы при затвердевании оксид алюминия, который может быть создан на поверхности подложки сжимающее напряжение, тем самым препятствуя зарождению и распространению трещин.

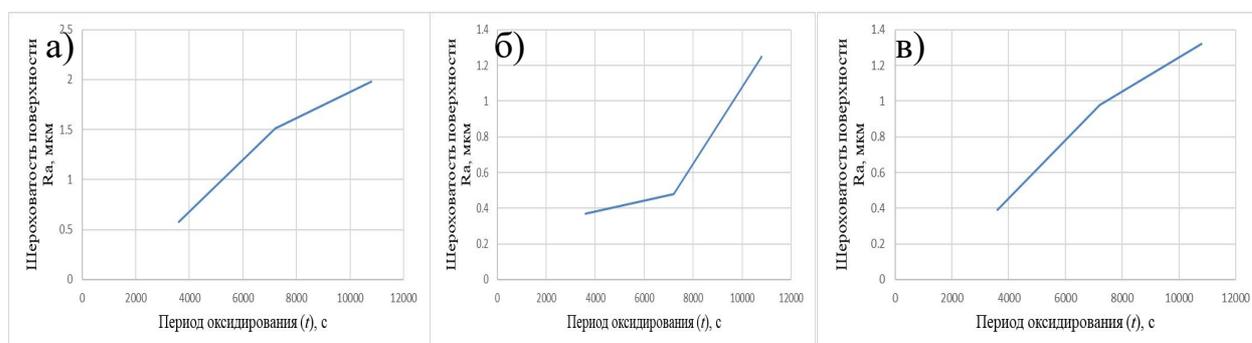


Рисунок 1.6 –Изменение период оксидирования и шероховатости поверхности: а - концентрация Na_2SiO_3 15 г/л; б - концентрация Na_2SiO_3 20 г/л; в - концентрация Na_2SiO_3 25 г/л

Выберите экспериментальные параметры концентрации Na_2SiO_3 20 г/л и время окисления 2 часа, чтобы провести эксперимент по микродуговому окислению и получить образцы G-17 и G-19. Затем проведите испытание на усталость.

диаграмма показывает на рисунке 1.7 Частота усталостных циклов в зависимости от количества циклов, Количество циклов усталости образца G-17 39468 раз, максимальная резонансная частота 41,25 Гц, время цикла усталости 1055 секунд. Количество циклов усталости образца G-19 28829, максимальная резонансная частота 37,49 Гц, время цикла усталости 834 секунды. Можно видеть, что усталостная долговечность образца G-19 меньше, чем у образца G-17, у которого время цикла усталости уменьшено на 20 %, а время цикла усталости уменьшено в 10639 раз.

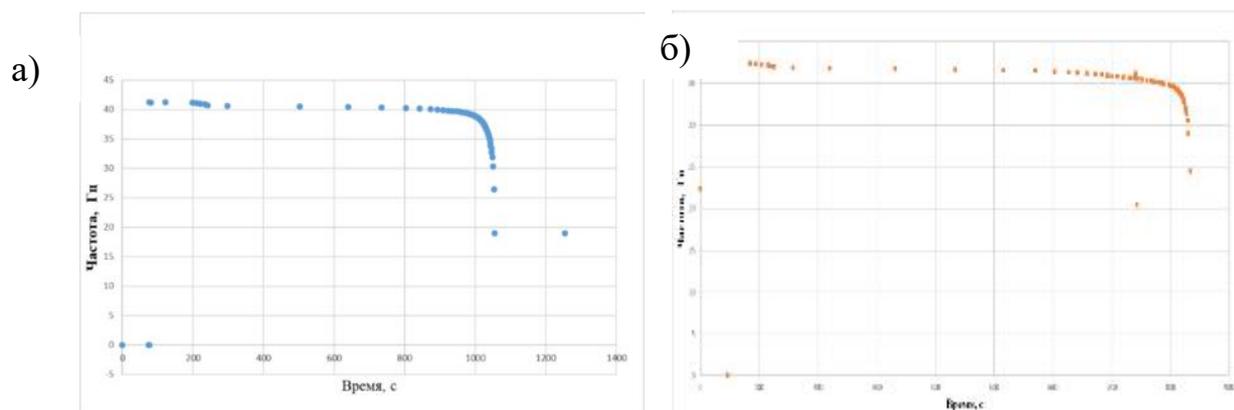


Рисунок 1.7 – График зависимости частоты от времени:
а - G-17; б - G-19

Результаты испытаний показывают, что усталостная долговечность алюминиевого сплава с покрытием, сформированным методом микродугового окисления, имеет определенный диапазон дисперсии при одинаковых условиях. Это связано с наличием незначительных трещин на поверхности оксидного слоя в результате изменения механизма усталостного разрушения рисунок 1.8. В заданных условиях данного эксперимента усталостная долговечность составила от 28800 до 39500 циклов.

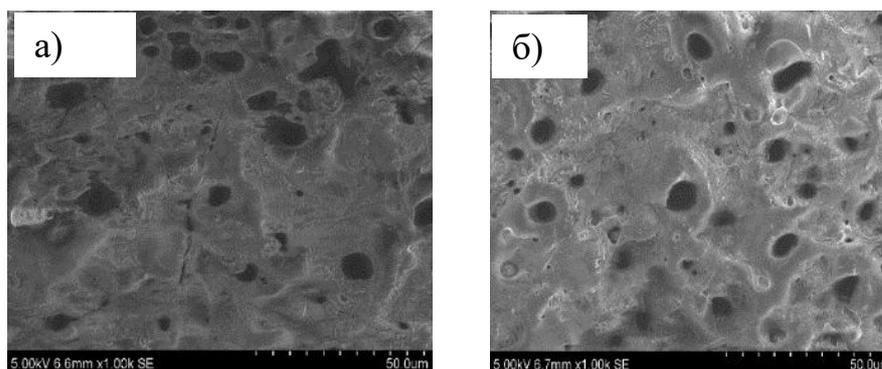


Рисунок 1.8- Топография поверхности покрытия:
а - G-19; б - G-17

После проведения усталостных испытаний в течение 400 с начали регистрацию акустической эмиссии (АЭ). Как видно из рисунка 1.9, в период времени 400-700 с сигналы не поступали, так как на этом этапе в образце начинают образовываться начальные трещины и появляются источник акустической эмиссии. Уровень находится в небольшом диапазоне, в результате чего прибор АЭ не принимает сигналы. После 700 с был зарегистрирован первый сигнал с высокой амплитудой, как показано на рисунке 1.10 а, в это время усталостная трещина начала быстро расти, образуя магистральную трещину. Во время роста трещины начинает генерироваться большое количество сигналов АЭ небольшой амплитуды с высокой активностью. Как показано на рисунке 1.10 б, это состояние, когда регистрируется подряд множество сигналов, вызванных пластической деформацией и разрушением материала в устье растущей трещины. Резонансная частота колебаний испытываемого образца быстро падает в связи с ростом магистральной трещины до момента усталостного разрушения. Это показывает, что использование технологии акустической эмиссии может быть использовано для прогнозирования усталостной долговечности.

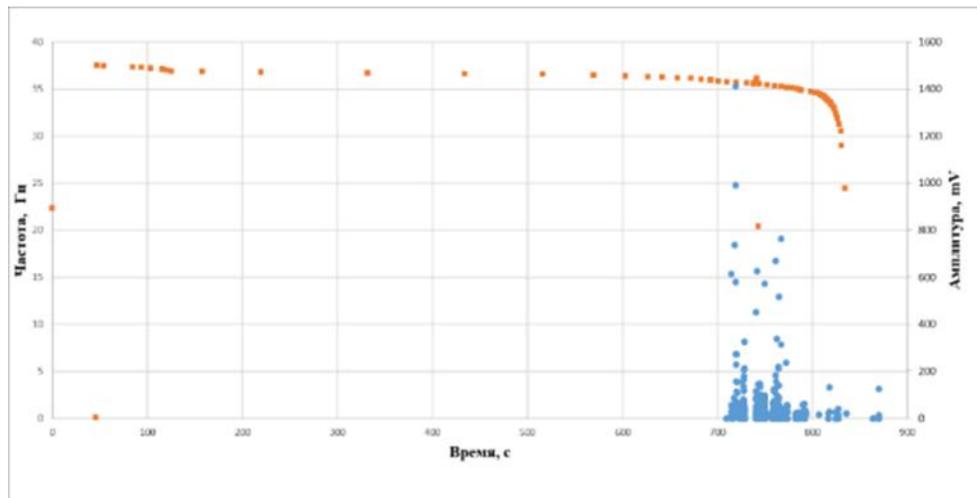


Рисунок 1.9 – Изменение сигналов акустической эмиссии и частоты колебаний образца при усталостных испытаниях

а)

б)

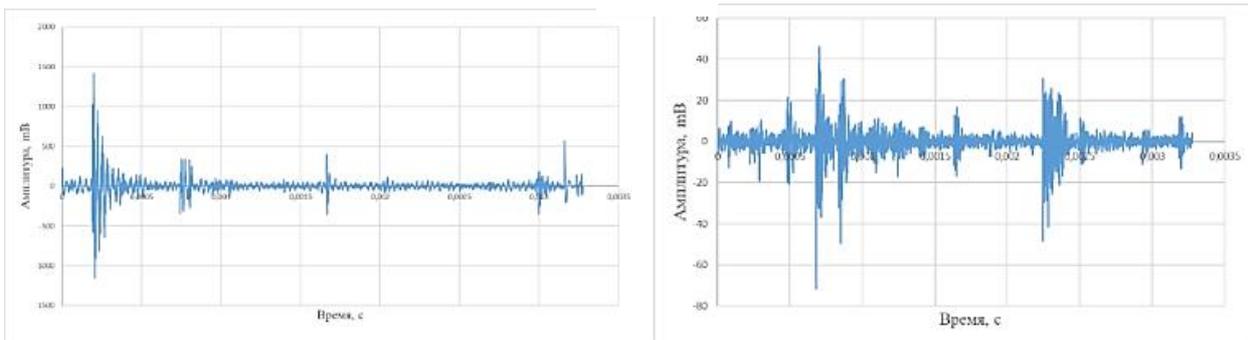


Рисунок 1.10 Сигнал акустической эмиссии:
а – первый сигнал
б - сигнал генерируется в середине

Заключение

В диссертации было проведено исследование влияния электролита различной концентрации, содержащего раствор Na_2SiO_3 , на характеристики образцов и покрытий, полученных на алюминиевом сплаве Д16 микродуговым оксидированием в течении разного периода оксидирования, а также выполнен анализ структуры поверхности и толщины покрытий с помощью электронной микроскопии и шероховатости поверхности. Испытание на усталость позволило установить влияние условий микродугового оксидирования покрытия и параметров нагружения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16.

В результате проведенных исследований было установлено:

1. Морфология поверхности микродугового оксидного покрытия из алюминиевого сплава представляет собой форму кратера с каналом, через который происходит поступление электролита к подложке в локальной области через образованный в процессе воздействия микродуги. Кратер образуется в результате быстрого затвердевания вплеснувшегося на поверхность расплава оксида алюминия при электрическом микродуговом пробое диэлектрического слоя и окислении в электролите слоя алюминия или алюминиевого сплава. В результате на поверхности образцов образуется керамика оксида алюминия, по виду и форме напоминающая кратеры вулкана.

2. Толщина покрытия, сформированного при микродуговом оксидировании, шероховатость поверхности линейно увеличивается с увеличением концентрации Na_2SiO_3 .

3. В одинаковых условиях усталостная долговечность алюминиевых сплавов с МДО-покрытием имеет определенный диапазон. Это связано с тем, что наличие мелких трещин на поверхности оксидного слоя изменяет механизм усталостного разрушения. В заданных условиях данного эксперимента усталостная долговечность составила от 28800 до 39500 циклов.

4. В результате исследования характера усталостного разрушения на основании регистрации акустической эмиссии и характеристики резонансных колебаний было установлено, что развитие трещин сдерживается покрытием до тех

пор, пока не разрушится от усталостного воздействия оксидный слой и не начнет расти магистральная трещина. Момент разрушения оксидного слоя может быть зарегистрирован несколькими или одним сигналом АЭ большой амплитуды. Дальнейший рост трещины сопровождается высокой активностью сигналов АЭ, генерируемых дислокациями в устье трещины, а также продвижением трещины, то есть разрушением материала. Снижение резонансной частоты колебаний образца подтверждается этим.

5. Технология акустической эмиссии может быть использована для характеристики развития усталостных трещин и прогнозирования усталостной долговечности.

Полученные при выполнении диссертации результаты могут быть использованы для формирования рекомендаций по выбору подходящего покрытия, формируемого на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием, чтобы обеспечить производство изделий с заданными усталостными характеристиками.