

**ПРАКТИКА УВЕЛИЧЕНИЯ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ  
НА АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ.**

*Рассмотрена практика увеличения токовой нагрузки на отечественных алюминиевых заводах. Показано, что граничным условием увеличения токовой нагрузки является геометрическая форма анодных штырей.*

**Ключевые слова:** алюминиевый электролизер, сила тока, анодный штырь, коррозия, сера.

На многих алюминиевых заводах осуществлялся ряд мероприятий, направленных на интенсификацию электролизных производств путем повышения силы тока. Причем увеличение силы тока производилось как на электролизерах с самообжигающимся анодом и верхним или боковым токоподводом, так и на электролизерах с предварительно обожженными анодами. В последнее время повышение силы тока производится в меньшей степени, однако это связано скорее не с технологичностью установленных электролизеров, а с исчерпанием возможностей заводских преобразовательных подстанций либо пропускной способностью линий электропередач. Потому можно констатировать, что предел повышения производительности посредством увеличения токовой нагрузки пока не достигнут. К примеру, изначально спроектированные на 150 кА электролизеры типа С8БМ в настоящее время эксплуатируются на силе тока до 185 кА.

В исследовательских работах некоторых авторов отмечается, что увеличение токовой нагрузки на электролизерах второго поколения лимитируется газогидродинамическими процессами эвакуации отходящих газов: при увеличении токовой нагрузки происходит линейное увеличение объемов образования отходящих газов, а потому сохранение токовой эффективности (выхода по току) при увеличении силы тока должно сопровождаться увеличением длины периметра анода для улучшения условий газоудаления, что подразумевает проведение комплексной модернизации парка электролизеров. Как частный случай, предлагается модернизация анодного узла путем установки на один катод нескольких анодов [1]. Это мнение логично и имеет определенную ценность для исследователей.

Есть мнение, что лимитирующей стадией процесса увеличения токовой эффективности является улучшение теплоотвода для поддержания оптимального теплового баланса электролизеров [2]. Из этого мнения вытекает вывод о необходимости модернизации катодного устройства путем разуплотнения катодного кожуха посредством изменения конструкции бортовой футеровки катода электролизера, к примеру, установкой карбид-кремниевых плит и/или ребер охлаждения по периметру металлоконструкций катода. Как част-

ный случай возможно изменение химического состава электролита и увеличение уровня металла.

Необходимо также рассмотреть мнение, что лимитирующей стадией процесса увеличения токовой нагрузки на электролизере с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом является МГД-нестабильность электролизера [3]. Для устранения МГД-нестабильности необходима комплексная модернизация токоподводящей ошиновки и оптимизация алгоритмов управления напряжением электролизера в АСУ ТП.

Все вышеперечисленные мнения имеют веские теоретические основания для существования, и уровень силы тока наверняка будет достигнут, когда вышеперечисленные факторы станут лимитирующими для дальнейшего повышения силы тока на электролизерах с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом, однако по факту на сегодня лимитирующим следует считать иной процесс. Производственная практика эксплуатации электролизеров второго поколения показывает, что в технологическом диапазоне силы тока (165-175 кА) электролизеров второго поколения лимитирующим производительностью агрегата процессом является не эвакуация отходящих газов, диссипация тепла и/или уровень МГД-нестабильности, а технологическая (операционная) деятельность. Так, на ОАО «РУСАЛ Братск» существуют электролизеры, которые при прочих равных условиях в течение продолжительного периода времени работают с токовой эффективностью на уровне 91,5 % выхода по току. В то же время, существуют электролизеры, производительность которых держится на уровне 75-85 %. При увеличении силы тока количество электролизеров с низкой производительностью увеличивается, а количество электролизеров с повышенной производительностью возрастает, однако электролизеры с повышенной производительностью в наличии остаются. В этом свете происходящие в электролизере тепловые, магнитогидродинамические и газодинамические процессы следует рассматривать в неидеализированном варианте.

Для определения причин снижения эффективности совокупности электролизеров, образующих электролизную серию, на ОАО «РУСАЛ Братск» были проведены исследования [4], заключающие-

\* - автор, с которым следует вести переписку.

ся в определении влияния сырьевых факторов на эффективность процесса электролиза при эксплуатации на повышенной силе тока. Дальнейшие исследования влияния технологических факторов эксплуатации электролизеров [5] развили наше понимание процессов, происходящих при увеличении токовой нагрузки на электролизерах второго поколения.

Практика увеличения токовой нагрузки на электролизерах второго поколения. Увеличение токовой нагрузки сопровождается снижением общей токовой эффективности (выхода по току) парка электролизеров. Происходит это в первую очередь в связи с дестабилизацией технологии анодного узла, повышенным образованием слоеный анода. Динамика образования слоений анода на одном из заводов, оснащенных электролизерами второго поколения, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Динамика образования слоений анода.

Анализ рис. 1 показывает, что в течение 2007-2008 гг. образование слоений анода было относительно ровным, но начиная с марта 2009 года отмечается рост тоннажа слоений анода. Рассмотрение динамики слоений анода в 2007-2008 гг. показывает, что можно выделить т. н. «фоновый» уровень слоений анода – 150 тонн. «Фоновый» уровень слоений анода, по всей видимости, связан с технологией производства анодной массы, все превышения над фоновым уровнем – технология ведения электролиза.

Сопоставление динамики слоений анода (рис. 1) и динамики изменения силы тока и расхода технологической электроэнергии (рис. 2) показывает наличие согласованности этих параметров, особенно в части изменения расхода технологической электроэнергии, что связано с общим увеличением падения напряжения в аноде из-за снижения эффективной площади анода вследствие образования слоений анода.

Параметрическая идентификация вероятных причин образования слоений анода в электролизном производстве показывает возможное влияние трех факторов:

- перегрев анода вследствие снижения столба анода и/или снижения положения анода относительно фланцевого листа;

- общий уровень технологической дисциплины при проведении операций перестановки анодных штырей и прорезки периферии анода;

- геометрическая форма используемых анодных штырей.

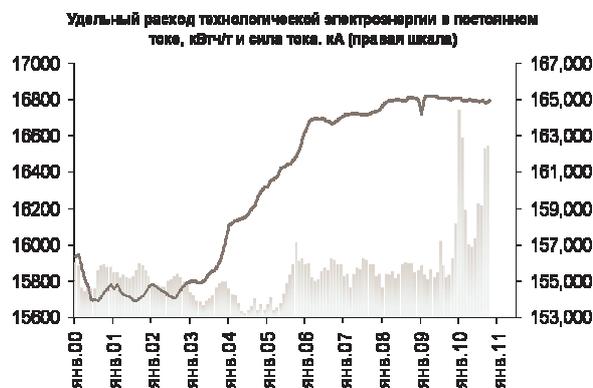


Рис. 2. Удельный расход технологической электроэнергии и динамика силы тока.

«Фоновый» уровень – технология производства анодной массы. Фоновые слоения анода оцениваются на уровне 150 т/мес., или 37,5 % от уровня слоений июля 2010 г. Как было написано выше, наиболее вероятной причиной наличия «фоновый» слоения анода является технология производства анодной массы. Сравнение рецептуры производства анодной массы на смежных заводах ОК РУСАЛ показывает, что анодная масса производства исследуемого завода отличается пониженным содержанием компонента «крупка 1». Увеличение содержания «крупки 1» экспертно позволит снизить выход слоений анода на 50 т/мес. (до 12,5 % от уровня июля 2010 г.)

Перегрев анода вследствие снижения столба анода и/или снижения положения анода относительно фланцевого листа. На рис. 3 приведена динамика технологического параметра «уровень металла», которая показывает наличие дефицита металла в конце 2009 – начале 2010 гг. Сопоставление динамики слоений анода в том же периоде (рис. 5) показывает, что снижение уровня металла сопровождалось увеличением количества слоений анода до 200 тонн от среднего значения, причем восстановление уровня металла позволило снизить количество слоений на сопоставимую величину, однако общий уровень слоений анода остался достаточно высоким (более 300 тонн). Отсюда следует вывод, что снижение уровня металла на 1 см сопровождается увеличением количества слоений анода до 200 тонн (до 50 % от всех слоений). Снижение столба анода на 15 см приводит к увеличению выхода слоений анода до 100 тонн (до 25 % всех слоений).

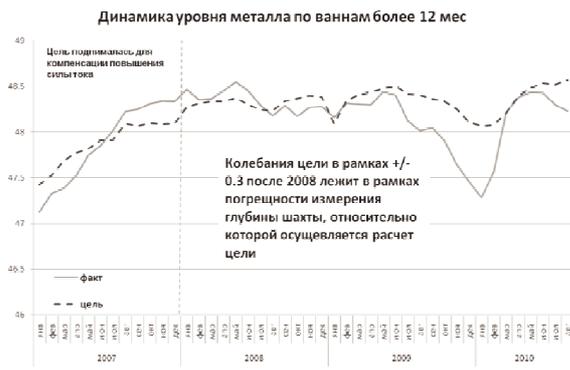


Рис .3. Динамика изменения технологического параметра «уровень металла».

Общий уровень технологической дисциплины при проведении операций перестановки анодных штыврей и прорезки периферии анода. В целом уровень дисциплины при проведении данных операций находится на достаточном ровном уровне. Для минимизации влияния человеческого фактора был проведен ряд мероприятий, направленных на повышение качества производимых операций. В первую очередь это выполнение всех операций в анодном узле в дневную смену и перевод на двухуровневую схему расстановки анодных штыврей (увеличение минимального расстояния при перестановке анодных штыврей в центральной части анода позволило снизить вероятность трещинообразования при раскручивании переставляемого штывря, образования продавов при перестановке из-за уменьшения глубины погружения анодного штывря в спеченную часть анода).

В зимний период происходит сезонное увеличение количества слоений анода, что связано в первую очередь с затруднением проведения технологических операций по прорезке (трамбовке) периферийной части анода. Куски анода в зимний период имеют несколько иную структуру образования: превалируют слоения с периферийной части анода. Данная проблема лежит в технической области эксплуатации обрабатываемой техники, а потому должна решаться дополнительными мероприятиями технической направленности.

Геометрическая форма используемых анодных штыврей. Для оценки влияния геометрии анодных штыврей на выход слоений анода была организована прямая оценка коррозии анодных штыврей во всех корпусах электролиза. Зависимость выхода слоений анода от коррозии анодных штыврей приведена на рис. 4.

Анализ рис. 4 показывает, что при уменьшении массы и длины анодного штывря ниже пороговой величины влияние штывря на технологию анода становится неотвратимо негативным: увеличение выхода слоений анода увеличивается в 4 раза! По факту июля 2010 г. слоения анода, связанные с эксплуатацией анодных штыврей с неоптимальной

геометрией, оцениваются в 100 тонн (25 % всех слоений), причем снижение количества замен анодных штыврей в рамках снижения издержек в 2009 году привело к кумулятивному накоплению корпусов электролиза с неоптимальным состоянием парка анодных штыврей.

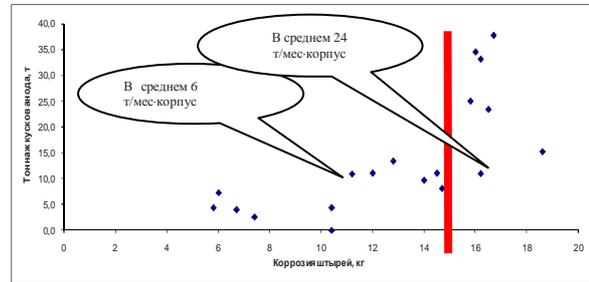


Рис. 4. Зависимость выхода слоений анода от коррозии анодных штыврей.

Характер образования слоений анода при достижении пороговой величины коррозии стальной части анодного штывря представлен на рис. 5. Стальная часть анодного штывря при перестановке раскручивается, что в условиях несоосной коррозии приводит к механическому воздействию на тело анода и, как следствие, к появлению микро- и макротрещин с последующим образованием слоений.

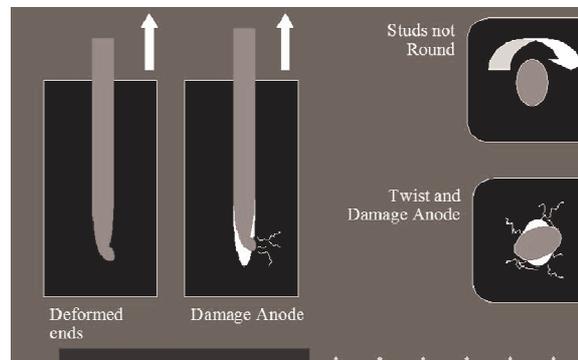


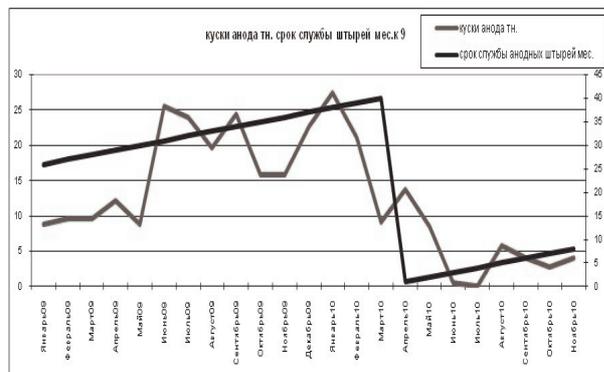
Рис. 5. Характер образования слоений анода.

Существует мнение, что основной причиной образования слоений анода является протекание двух противоположных процессов – температурного расширения стального штывря и усадки анодной массы при коксовании пека. Однако это мнение весьма спорно по нескольким причинам:

– величина линейного расширения стали в рассматриваемом температурном диапазоне (микрометры), равно как и сжатие анодной массы в том же рассматриваемом температурном диапазоне (микрометры), несоизмеримы с коррозионной геометрией реального анодного штывря (сантиметры);

– у стали как материала для изготовления анодных штырей нет реальной альтернативы по величине токопроводности, механической стойкости в требуемом температурном диапазоне, технологичности обработки, доступности и дешевизны;

– данная гипотеза не объясняет качественного снижения образования слоений анода при проведении замены анодных штырей (рис. 6).



**Рис. 6. Динамика образования слоений анода при проведении замены анодных штырей.**

Определение влияния различных факторов на повышение токовой эффективности работы алюминиевых электролизеров второго поколения в условиях повышения силы тока. В общем случае коррозия анодных штырей приводит к образованию следующих соединений:  $FeO$ ,  $FeS$ ,  $FeSO_4$ , возможно также образование иных соединений железа, серы и кислорода. Потому интенсивность коррозионных процессов (изменение веса стальной части анодного штыря), по сути, это функция прихода тепла (силы тока) и содержания серы в анодной массе:

$$M_{Fe} = f(I, C_{S_{am}}) \quad (1)$$

А потому задача повышения производительности электролизеров второго поколения в условиях недопущения снижения токовой эффективности сводится, в общем случае, к недопущению достижения стальной части анодного штыря критической величины коррозионной убыли веса. Критическая масса, согласно приведенной на рис. 4 зависимости, составляет 15 кг.

В условиях содержания серы в анодной массе 1,5 % и силы тока 170 кА скорость коррозии анодных штырей составляет 0,4 кг/мес., потому критическим сроком службы анодного штыря является  $15/0,4 = 37,5$  месяцев. Увеличение силы тока на 1 кА увеличивает скорость коррозии анодного штыря на величину до 0,05 кг/мес., увеличение содержания серы на 0,2 % увеличивает скорость коррозии на эквивалентную величину. Однако данная информация требует уточнения в лабораторных условиях.

Замена анодных штырей в корпусе электролиза продолжается 1 месяц, потому производить замену старых анодных штырей на новые чаще, чем 1 раз в 24 месяца, технологически нецелесообразно.

#### Выводы.

1. Показано, что в последнее время интенсификация производства алюминия посредством увеличения токовой нагрузки на электролизерах с верхним токоподводом и самообжигающимся анодом несколько замедлилась. Это связано не с технологической либо конструкционной особенностью установленных электролизеров, а с возможностями систем электроснабжения и преобразования электрического тока алюминиевых заводов.

2. Рассмотрены существующие мнения о лимитирующей стадии повышения токовой нагрузки на действующих электролизерах. Показано, что влияние газодинамики, диссипации тепла, МГД-нестабильности на увеличение силы тока несколько преувеличено, лимитирует процесс повышения силы тока в настоящее время технология анодного узла (количество образования слоений анода).

3. Сделан факторный анализ образования слоений анода, показано направление оптимизации токовой эффективности электролизеров второго поколения путем снижения образования слоений анода.

4. Показано, что определяющим фактором выхода слоений анода является геометрия анодного штыря, ее изменение в условиях коррозии в теле анода.

5. Показана необходимость дополнительного изучения зависимости коррозии анодного штыря от содержания серы в анодной массе.

#### Литература

1. Бегунов А.И., Бегунов А.А. Решения по радикальной модернизации электролизных производств с анодами Зодерберга российской алюминиевой промышленности // Цветные металлы – 2010: сб. докл. второго междунар. конгресса. Красноярск, 2010. С. 581 – 589.

2. Межберг Т.В. Оптимизация технологии в сериях электролиза алюминия, при использовании модифицированного литием электролита: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2004.

3. Алпатов Ю.Н., Турусов С.Н. Решение задачи параметрической идентификации и оптимизации процесса получения алюминия на электролизерах с верхним токоподводом // Экология. Образование. Здоровье: тр. Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2000. С. 105-124.

4. Победаш А.С. Повышение эффективности производства алюминия путем увеличения срока

службы анодных штырей: автореф. кандидатской дис. ... канд. техн. наук, Иркутск, 2009.

5. Повышение эффективности работы алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом посредством диф-

ференцированной расстановки анодных штырей / С.И. Ножко [и др.] // Цветные металлы. 2010. № 3. С. 62 – 64.

УДК 528.3(21)

В.Г. Иванов

### СЛУЧАЙНЫЕ И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАЗНОСТЕЙ $d$ В НИВЕЛИРНЫХ ЛИНИЯХ I КЛАССА

*На примере четырех линий нивелирования I класса, проложенных по территории азиатской части России в разные годы, рассмотрены накопления разностей  $d$ . По отдельным разностям очевиден их выход за коридор возможного случайного накопления, что является следствием значительных систематических погрешностей, проявившихся по данной линии нивелирования.*

**Ключевые слова:** разности  $d$ , случайные и систематические погрешности точности нивелирования.

Исследованию случайных и систематических ошибок и соотношению между ними в отечественной и зарубежной литературе посвящено много работ, в том числе и в точном нивелировании. Сложность заключается в том, что одни и те же источники погрешностей в зависимости от порядка взятия отсчетов, от рельефа местности, времени суток и сезона производства работ, направления нивелирной линии и других условий могут проявляться в виде как случайных, так и систематических ошибок.

Наши отечественные практики, корифеи науки Ф.Н. Красовский и А.С. Чеботарев считали, что вопросы оценки повышения точности нивелирования нельзя решить без раскрытия природы и механизма действия источников систематических ошибок, хотя бы главнейших [13].

В нивелировании I класса у нас в стране средние квадратические случайные  $\eta$  и систематические  $\sigma$  ошибки подсчитываются через известные разности  $d$  [1] по формулам

$$\eta_5^2 = \frac{1}{4n} \sum \frac{d_5^2}{r};$$

$$\eta_6^2 = \frac{1}{4n} \sum \frac{d_6^2}{r},$$

где  $n$  – число секций в ходе,  $r$  – длина секции в км.

По этим же разностям  $d_5$  и  $d_6$  подсчитываются и средние квадратические систематические ошибки  $\sigma_5$  и  $\sigma_6$  по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{4\sum L} \sum \frac{S^2}{L},$$

где  $S$  – величины, выбираемые с графиков однообразного накопления соответственно разностей  $d_5$  и  $d_6$  на участках протяженностью  $L$ .

Как известно, всему отечественному нивелированию в целом свойственно преобладание отрицательных разностей, особенно  $d_1, d_2, d_3$  и  $d_6$  [3, 4]. По отдельным линиям накопления разностей  $d$  достигают многих десятков и даже первых сотен мм.

Приведем в таблице только десять из множества подобных линий, проложенных по территории азиатской части России в разные периоды с 1960 по 2001 гг.

В связи с ограниченностью объема статьи на рисунках приведены всего четыре графика накоплений разностей  $d_1 \dots d_6$ , построенные не по секциям, а по звеньям по следующим линиям: Курган – Новосибирск, Чокурдах – Оймякон, Култук – Чита и Татаурово – Новый Уоян.

По линии Курган – Новосибирск (рис. 1) при умеренном накоплении разностей  $d_1, d_2$  и  $d_5$  сразу же пошли накопления отрицательных разностей  $d_3, d_4$  и  $d_6$ , достигшие к концу линии соответственно величин –133,6 мм, –77,7 мм и –106,4 мм.

По линии Чокурдах – Оймякон (рис. 2), имеющей большое протяжение – 1586 км, – разности  $d_1$  и  $d_2$  были преимущественно отрицательные и достигли величин –70,0 мм и –85,0 мм. А вот разности  $d_3, d_4$ , и  $d_6$  были преимущественно положительные, и их накопление к концу трассы достигло больших величин.