

УДК 621.315.552

Исследование коррозионной стойкости алюминиево-циркониевого сплава для кабелей нефтепогружных электронасосов

Сахарова Екатерина Сергеевна

esakharova574@gmail.com

SPIN - код: 9912-8811

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено влияние малых добавок циркония на свойства алюминиевого сплава типа ТАС-25. Проведено исследование коррозионной стойкости алюминиево-циркониевого сплава и меди в различных средах, характерных для эксплуатации кабельного изделия в нефтяных скважинах. По результатам эксперимента установлены зависимости изменения массы, электрического сопротивления и физико-механических свойств образцов в зависимости от времени выдержки в средах. Анализ результатов позволил выявить наиболее агрессивные среды для данных материалов. Также проведено испытание на стойкость к изгибу на $\pm 90^\circ$, по результатам которого сделаны выводы о возможности надежной эксплуатации кабеля с токопроводящей жилой из алюминиевого сплава.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, цирконий, токопроводящая жила, кабель, нефтяная промышленность, коррозионная стойкость

Investigation of corrosion resistance of aluminium-zirconium alloy for cables of oil-submersible electric pumps

Sakharova Ekaterina Sergeevna

esakharova574@gmail.com

SPIN-code: 9912-8811

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The influence of small zirconium additives on the properties of an aluminium alloy of the ZTAL type is considered. The corrosion resistance of aluminium-zirconium alloy and copper in various medias typical for the operation of cable products in oil wells has been studied. According to the experimental results, the dependences of changes in mass, electrical resistance, and physical and mechanical properties of the samples were established depending on the exposure time in the media. The analysis of the results made it possible to identify the most aggressive medias for these materials. A test for resistance to bending at $\pm 90^\circ$ was also conducted, according to the results of which conclusions were drawn about the possibility of reliable operation of a cable with a conductive core made of aluminium alloy.

Keywords: aluminium alloy, zirconium, conductive core, cable, oil industry, corrosion resistance

Введение. Как правило, для изготовления токопроводящих жил кабелей для нефтепогружных электронасосов используют медь. Это связано с превосход-

ными механическими и электропроводными свойствами данного материала, а также высокой стойкостью к агрессивным эксплуатационным средам нефтяных скважин. Несмотря на достоинства меди, она также обладает некоторыми недостатками, основным из которых является ее высокая стоимость, что способствует росту спроса алюминия на рынке. Этот фактор объясняет актуальность исследования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов для оценки возможности их использования в кабелях для нефтяной промышленности [1, 2].

Условия эксплуатации в нефтяной скважине являются одними из самых агрессивных для кабельной продукции [3]. Это связано с наличием рабочих температур, достигающих 230 °С, а также высоким давлением и разнообразным набором веществ и компонентов скважин (сероводород, щелочные и кислые среды, углеводородные соединения и др.) [3, 4]. Такие условия эксплуатации вынуждают рассматривать алюминиевые сплавы, обладающие высокой стабильностью различных свойств при нагреве вплоть до рабочих температур около 230 °С.

Цель данной работы заключается в исследовании коррозионной стойкости термокоррозионного алюминиево-циркониевого сплава типа ТАС-25 (ГОСТ Р МЭК 62004–2014).

Материалы и методы. Объектами исследований в данной работе являются токопроводящие жилы из алюминиево-циркониевого сплава сечением 25 мм² и из меди сечениями 16 и 25 мм².

Исследуемый сплав системы Al–Zr типа ТАС-25 по ГОСТ Р МЭК 62004–2014 является термокоррозионным алюминиевым сплавом. Его характерные свойства получены в результате небольшого добавления циркония в алюминиевую основу, что способствует значительному увеличению температуры рекристаллизации, трещиностойкости, коррозионной стойкости. В совокупности улучшение упомянутых свойств увеличивает срок службы кабельного изделия при его эксплуатации в повышенных температурах [5].

Для системы Al–Zr в области пониженного содержания циркония характерна перитектическая реакция, в результате протекания которой образуются интерметаллидные соединения Al₃Zr, улучшающие механические и эксплуатационные свойства сплава [6]. Диаграмма состояния системы Al–Zr приведена на рис. 1.

Исследование коррозионной стойкости сплава и меди к различным средам, а также стойкости к изгибу на ±90° проводились на испытательной базе ОАО «ВНИИКП».

Для оценки коррозионной стойкости были подготовлены образцы из алюминиевого сплава сечением 25 мм² и из меди сечением 16 мм² трех различных длин: для оценки изменения массы образцов, физико-механических характеристик и электрического сопротивления (рис. 2).

Исследование проводилось в течение 126 суток следующих средах: 1%-ный раствор соляной кислоты (HCl), 1%-ный раствор серной кислоты (H₂SO₄), 1%-ный раствор плавиковой кислоты (HF), 1%-ный раствор муравьиной кислоты (CH₂O₂), 1%-ный раствор уксусной кислоты (CH₃COOH), ди-

стиллированная вода (H_2O), 3%-ный раствор NaCl с добавлением перекиси водорода (H_2O_2) по ГОСТ 10929, типовой буровой раствор (45%-ный раствор бромиды кальция на водной основе (CaBr_2) по МЭК 60092-360), 1%-ный раствор гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 1%-ный раствор гидроксида натрия (NaOH), масло СЖР-1, газовая среда сероводорода (H_2S).

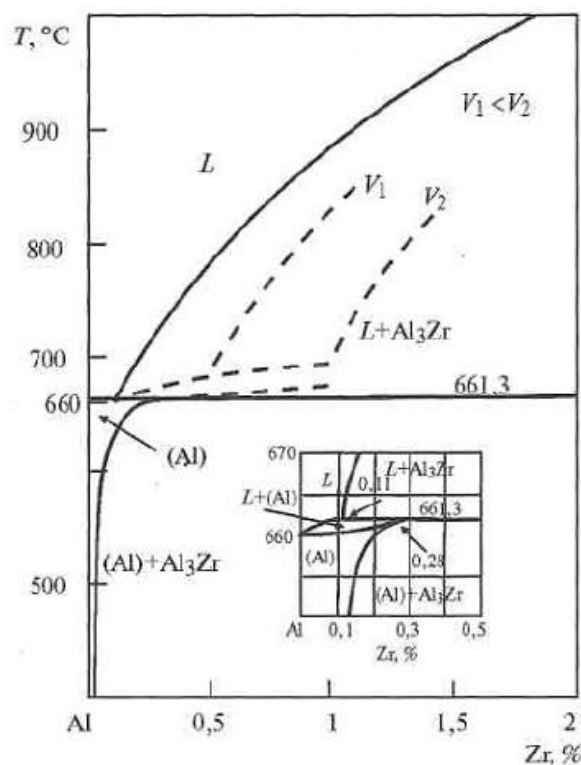


Рис. 1. Диаграмма состояния Al–Zr перитектического типа со стороны алюминия

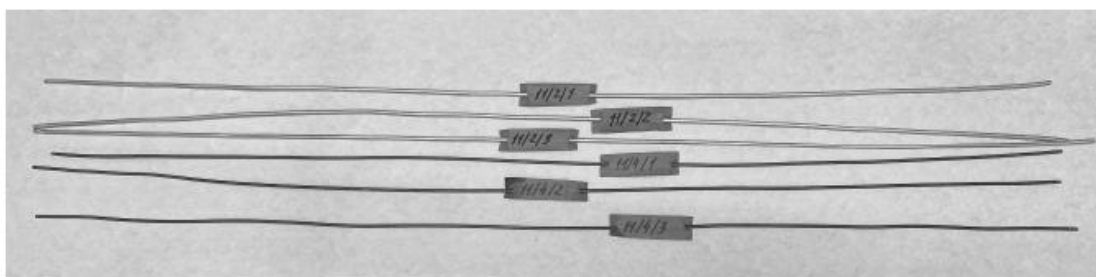


Рис. 2. Внешний вид образцов для исследования изменения электрического сопротивления в процессе выдержки в коррозионно-активных средах

Для испытания на стойкость к изгибу, проводившемуся по ГОСТ 12182.8–80, использовали три медных образца сечением 16 мм^2 и три образца из алюминиево-циркониевого сплава сечением 25 мм^2 . Диаметр оправки составлял 60, 80, 100 и 200 мм, угол изгиба равнялся 90° .

Результаты. По окончании испытания были построены зависимости изменения исследуемых характеристик (массы, физико-механических свойств

и электрического сопротивления) от времени выдержки образцов в каждой из исследуемых сред. На рис. 3–5 представлены графики результатов испытаний для некоторых наиболее агрессивных для алюминиевого сплава сред.



Рис. 3. Изменение массы образцов из алюминиевого сплава и меди в течение 126 суток в среде 1%-го раствора HF

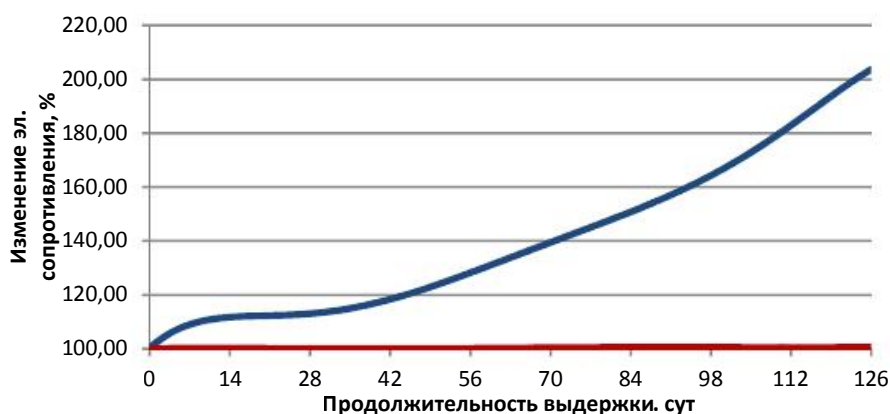


Рис. 4. Изменение электрического сопротивления образцов из алюминиевого сплава и меди в течение 126 суток в среде 1%-го раствора HF

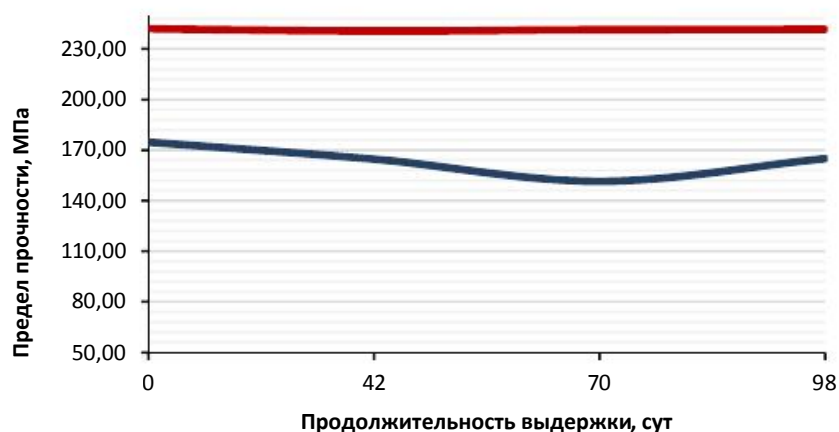


Рис. 5. Изменение предела прочности образцов из алюминиевого сплава и меди при выдержке в течение 98 суток в среде 1%-го раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Результаты испытания на стойкость к изгибу приведены в таблице.

Результаты испытания на стойкость к изгибу на $\pm 90^\circ$

Материал, сечение	№ образца	Наружный диаметр жилы, мм	Количество циклов изгиба					
			Диаметр оправки, мм	Количество циклов	Диаметр оправки, мм	Количество циклов	Диаметр оправки, мм	Количество циклов
Медь, 16 мм ²	1	4,6	60	22	80	56	200	203
	2	4,6	60	25	80	53	200	155
	3	4,6	60	18	80	50	200	161
Алюминиевый сплав, 25 мм ²	1	5,6	80	14	100	26	200	100
	2	5,6	80	10	100	21	200	121
	3	5,6	80	14	100	21	200	103

Обсуждение. В качестве критерия агрессивного воздействия сред на образцы было принято снижение их массы более чем на 5 %. Анализ данных, полученных в результате исследования, позволяет заключить, что наибольшую агрессивность по отношению к алюминиевому сплаву проявляют щелочные (NaOH, Ca(OH)₂) и кислые (HCl, H₂SO₄, HF) среды. Для меди, в свою очередь, наиболее агрессивной средой оказался сероводород (H₂S), в то время как алюминиевый сплав продемонстрировал в данной газовой среде высокую коррозионную стойкость. В остальных средах значимой разницы в коррозионной стойкости исследуемых материалов выявлено не было.

На графиках (рис. 4), показывающих изменение электрического сопротивления образцов в процессе их выдержки в исследуемых средах, видно, что в процессе растворения образцов электрическое сопротивление образцов из алюминия увеличивается. Такое изменение исследуемого параметра обусловлено уменьшением поперечного сечения образцов в процессе испытания.

При анализе результатов физико-механических характеристик можно сделать вывод о том, что наибольшее понижение предела прочности выявлено у образцов из алюминиево-циркониевого сплава, выдержанных в щелочном растворе Ca(OH)₂. По окончании испытания значение предела прочности снизилось примерно на 5,54 %.

Результаты испытаний на стойкость к изгибу показали, что алюминиевый сплав демонстрирует меньшее количество циклов до разрушения по сравнению с медной жилой, однако порядок значений является сопоставимым. При оценке перспективы применения алюминиево-циркониевого сплава в кабельной продукции для нефтяной промышленности следует учитывать, что реальные условия эксплуатации исключают воздействие многократного изгиба. Следовательно, механических характеристик жилы из алюминиевого сплава достаточно для обеспечения требуемой надежности и долговечности изделия.

Заключение. По результатам исследований можно сделать выводы о том, что наиболее агрессивными средами для алюминиево-циркониевого

сплава типа ТАС-25 являются кислотные среды (HCl , H_2SO_4 , HF), а также щелочные растворы (например, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и NaOH). В то же время, в среде сероводорода (H_2S) сплав продемонстрировал повышенную коррозионную стойкость, превосходящую стойкость меди. Результаты механических испытаний на изгиб подтверждают, что алюминиево-циркониевый сплав способен обеспечить требуемый ресурс и надежность кабельных изделий для нефтепогружных электронасосов.

Список источников

- [1] *Инновации в жилу*. URL: https://kamkabel.ru/netcat_files/userfiles/Publikatsii/skanirovanie0009.pdf (дата обращения 15.12.2024).
- [2] Chernetsov A.S., Sakharova E.S., Pakhomova S.A., Kharchenko D.A. Study of the aluminium alloy properties for the cable production. *7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, Moscow, 2025, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970792>
- [3] Балашов А.И., Боев М.А., Воронцов А.С. и др. *Кабели и провода. Основы кабельной техники*. Москва, Энергоатомиздат, 2009, 470 с.
- [4] Плотникова И.Н. *Элементный состав нефти и рассеянного органического вещества и методы их изучения*. Казань, Казанский университет, 2012, 25 с.
- [5] Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Трифоненков Л.П. Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al-Zr для производства электропроводников с помощью методов литья и обработки давлением. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2012, № 1, с. 51–55.
- [6] Бернгардт В.А., Федорова О.В. Исследование влияния циркония и РЗМ на структуру и свойства алюминиевой катанки. *Материаловедение и металлофизика легких сплавов. III Международ. науч. школа для молодежи: сб. тр.* Екатеринбург, УрФУ, 2014, с. 50–55.