

# Оценка ингибиторов окисления для соединения алюминиевых проводников

С. М. Коробейников, \* В. А. Ломан

Новосибирский государственный технический университет,  
г. Новосибирск, 630073, Россия, \*e-mail: [Loman\\_95@mail.ru](mailto:Loman_95@mail.ru)

Поступила в редакцию  
После доработки  
Принята к публикации

Большое переходное сопротивление между проводниками может вызывать потери электроэнергии, а также приводить к увеличению пожарной опасности на энергетических объектах. Это особенно актуально для алюминиевых проводников, поскольку на поверхности алюминия при взаимодействии с кислородом, содержащимся в воздухе, образуется прочная диэлектрическая оксидная пленка. Эта оксидная пленка значительно увеличивает переходное сопротивление. Одним из способов решения данной проблемы является использование ингибиторов окисления, которые могут значительно снизить контактное сопротивление. Представлено сравнение ингибиторов окисления производителей из разных стран. Также приведены результаты исследований ингибиторов под воздействием высоких и низких температур. Относительно высокая эффективность ингибиторов показана как средство снижения переходного сопротивления.

*Ключевые слова:* алюминий, электрический контакт, окисление алюминия, ингибитор окисления, потери энергии, переходное сопротивление, высокоточные измерения

УДК 62-97,621.3.049.7,621.3.06,537.312

## ВВЕДЕНИЕ

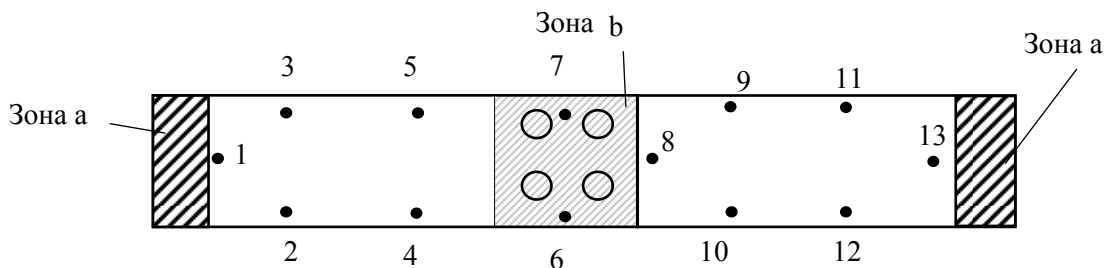
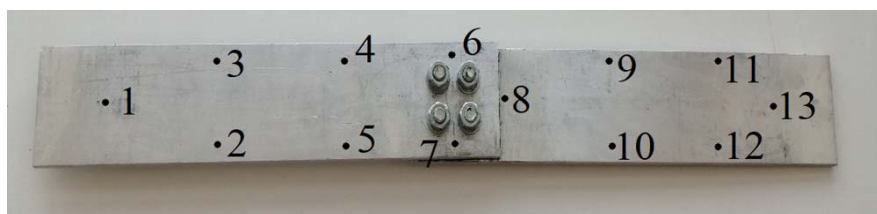
Электрический контакт – это соединение двух проводников, обеспечивающее надежное протекание тока. Электрические контакты являются необходимым и важным элементом в электрических сетях любого класса напряжения и продолжают быть объектами активных исследований [1–4]. Контакт должен обеспечивать высокую проводимость соединения и минимальные потери. Существуют два типа контактов – неразъемные и разъемные. Разъемные соединения могут быть цельнометаллическими с физическим сварным контактом и сжимные, которые объединяются в одну конструкцию с помощью механического контакта.

Значение контактного сопротивления зависит от степени окисления контактных поверхностей проводников. Из-за воздействия на металл окружающей среды, кислорода и влаги образуется оксидная пленка с высоким электрическим сопротивлением. Важно, что в случае применения гетерогенных металлов кроме обычного окисления происходит электрохимическое окисление металлов. А это многократно увеличивает сопротивление контакта, снижает надежность соединения и даже может привести к его разрушению.

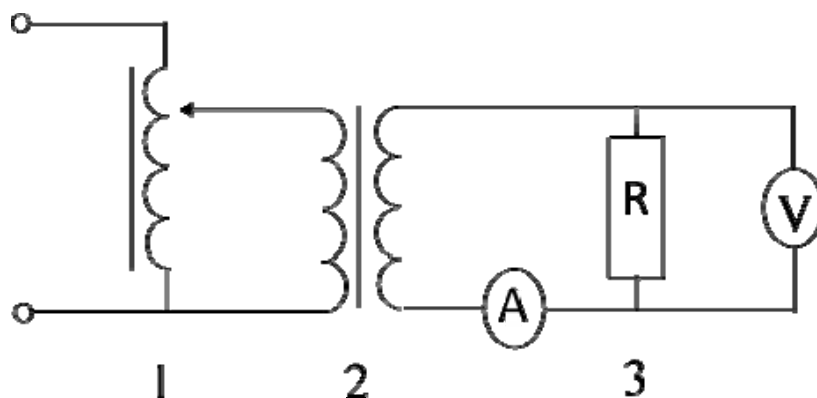
Существует множество способов, обеспечивающих надежное соединение металлов без

образования гальванических пар и позволяющих обойти влияние окисления металла [5–10]. Однако для их применения необходимо лабораторное оборудование, что не дает возможности использовать эти методы непосредственно на месте соединения проводников в случае временного подключения дополнительного оборудования, удлинения проводящего элемента, замены или ремонта элемента контакта. Особенно указанная проблема актуальна для труднодоступных районов, куда невозможно оперативно перевезти необходимые устройства или обеспечить их подходящими условиями работы. В этом случае наиболее экономичным, простым и удобным средством является применение электропроводящих смазок и ингибиторов окисления [11–13]. Они просты в эксплуатации, позволяют изменять площадь контакта материалов и обеспечивают высокую скорость соединения проводников, кроме того, значительно повышают стойкость материала к истиранию [14].

Цель данной работы – оценка эффективности применения ингибитора окисления в соединении контактной пары алюминий-алюминий при нормальных условиях и низких температурах. Этот тип контактной пары выбран из тех соображений, что на поверхности алюминия всегда быстро образуются прочные оксидные пленки, которые невозможно разрушить при любых



**Рис. 1.** Пример образца и схема расположения точек измерения: зона *a* – место присоединения образца к измерительной цепи, зона *b* – место контакта алюминиевых шин, 1–13 – точки измерения.



**Рис. 2.** Схема измерения: 1 – ЛАТР; 2 – понижающий трансформатор; 3 – образец.

давлениях нажатия. А оксидные пленки значительно повышают сопротивление контакта со всеми вытекающими последствиями (нагрев места контакта, потери электроэнергии и т.д.).

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНГИБИТОРОВ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

В качестве образцов использовались четыре алюминиевые шины толщиной 6 мм и длиной 30 мм, соединенные попарно внахлест с помощью четырех болтов М8, усилие прижатия контролировалось динамометрическим ключом и составляло 10 Н. В результате площадь контактной площадки Al-Al составила 3600 мм<sup>2</sup>. Шины перед сборкой и нанесением ингибиторов окисления зачищались от окисла и грязи механическим путем.

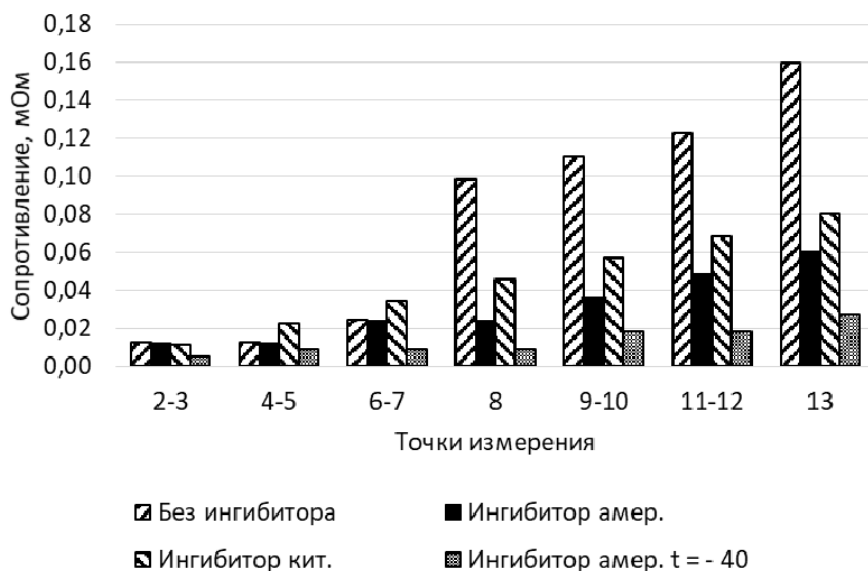
На рис. 1 представлены пример образца для измерений и схема расположения точек измерения. Замеры падения напряжения проводились между точкой 1 и текущей точкой. Было испытано два образца, сначала без

ингибитора окисления, а потом с нанесением на один образец ингибитора американского производства, а на второй – китайского. Ингибиторы предоставлены заказчиком исследования.

В схеме (рис. 2) использовался лабораторный автотрансформатор ЛАТР-1М для регулирования подаваемого напряжения, к нему был подключен тороидальный понижающий трансформатор для повышения тока. Ко вторичной обмотке трансформатора прижимными контактами присоединялись образцы. Ток во вторичной обмотке трансформатора измерялся токоизмерительными клещами СЕМ DT-3368. Значения токов находились в диапазоне 80–95А. Одновременно с током измерялось падение напряжения между 1-й и остальными 12 точками. При этом точки 1–7 находились на одной шине, а точки 8–13 – на другой. Для измерения напряжения использовался осциллограф Tektronix TDS 1002. По результатам двух серий измерений с каждым образцом в соответствии с законом Ома рассчитывалось сопротивление образцов ( $I$ ):

**Таблица.** Значения напряжения в точках и сопротивления образцов между точкой 1 и измеряемой точкой

Образец без ингибитора № 1												
Точка №	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{cp},$ мВ	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	8,0	9,0	9,0	10,0	10,0	13,0
$R_{cp},$ МОм	0,012	0,012	0,012	0,012	0,025	0,025	0,098	0,110	0,110	0,123	0,123	0,159
Образец с американским ингибитором № 2												
Точка №	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{cp},$ мВ	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	5,0
$R_{cp},$ МОм	0,012	0,012	0,012	0,012	0,024	0,024	0,024	0,036	0,036	0,048	0,048	0,060
Образец с китайским ингибитором № 3												
Точка №	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{cp},$ мВ	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0	7,0
$R_{cp},$ МОм	0,011	0,011	0,023	0,023	0,034	0,034	0,046	0,057	0,057	0,068	0,068	0,080
Образец с американским ингибитором № 2. После охлаждения до – 40°С												
Точка №	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{cp},$ мВ	0,5	0,5	0,75	0,75	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0
$R_{cp},$ МОм	0,004	0,004	0,007	0,007	0,009	0,009	0,009	0,018	0,018	0,018	0,018	0,027



**Рис. 3.** Сопротивление образцов между точкой 1 и другими точками измерения.

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Средние результаты, полученные по серии измерений, представлены в таблице. По полученным данным строились графики распределения сопротивления по точкам (рис. 3).

Результаты равноудаленных точек объединены, так как были взаимно равны при всех экспериментах.

Как видно на рис. 3, рост сопротивления обоих образцов до места контакта практически одинаков и имеет линейный характер. Однако в месте контакта двух шин у образца № 1

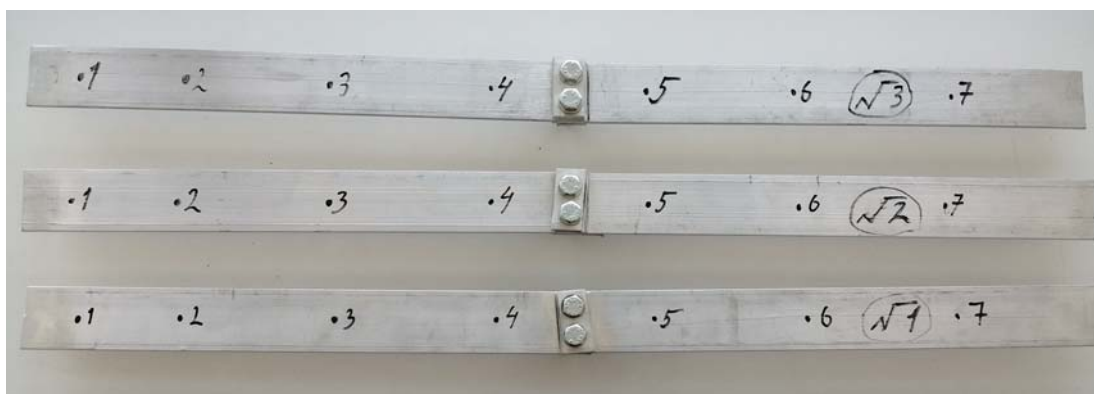


Рис. 4. Образцы: № 1 – без ингибитора; № 2 – с американским ингибитором; № 3 – с китайским ингибитором.

(без ингибитора окисления) сопротивление резко возрастает, в то же время у образцов с ингибитором (американским и китайским) сопротивление практически не изменяется. Значение контактного сопротивления без ингибитора окисления составляет примерно 0,08 мОм, тогда как с ингибитором – менее 0,01 мОм. Следует отметить, что при использовании американского ингибитора между точками 6–7 и 8 разницы в сопротивлении не замечено, а у китайского имеется незначительная разница. При дальнейшем отдалении от места контакта сопротивления обоих образцов линейно возрастают, как и должно быть при протекании тока по однородному проводнику.

Так как образцы с ингибитором показали сопротивление явно ниже, чем без ингибитора, дальнейшие опыты проводились только с образцами с ингибитором. Вторая серия опытов осуществлялась с образцами, охлажденными до температуры ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Для охлаждения образцов применялась лабораторная программируемая холодильная камера КХТ-0,16-024. После достижения необходимой температуры ( $-45^{\circ}\text{C}$ ) проводились испытания, аналогичные предыдущему случаю. Полученные результаты представлены в таблице, а полученные зависимости распределения сопротивления – на рис. 3.

Как видно из рис. 3, сопротивление с ингибитором образца после охлаждения много меньше, чем до охлаждения. Сопротивление образца с ингибитором более чем в 2 раза меньше, чем сопротивление образца до охлаждения, а после места контакта почти в 4 раза меньше, чем у образца без ингибитора.

Следует также отметить, что при нормальных условиях разница между сопротивлениями образцов без ингибитора и с ингибитором составляет около 35%, а при температуре минус  $40^{\circ}\text{C}$  разница составляет почти 70%. Это означает, что эффективность применения ингибиторов окисления возрастает со снижением температуры. Что может быть очень актуально для

районов с продолжительной зимой и низкими температурами в этот период, например в районах Крайнего Севера.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНГИБИТОРОВ ОКИСЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Так как первоначальные опыты с ингибитором американского производства показали успешность его применения, было решено провести исследования сравнения американского и его китайского аналога. Для этого применили шины шириной 40 мм, толщиной 4 и длиной 370 мм, соединенные парой болтов М8 таким образом, что контактная площадка составляла 40 мм на 20 мм. Полная длина собранной конструкции равнялась 700 мм и была ограничена внутренним размером холодильной камеры.

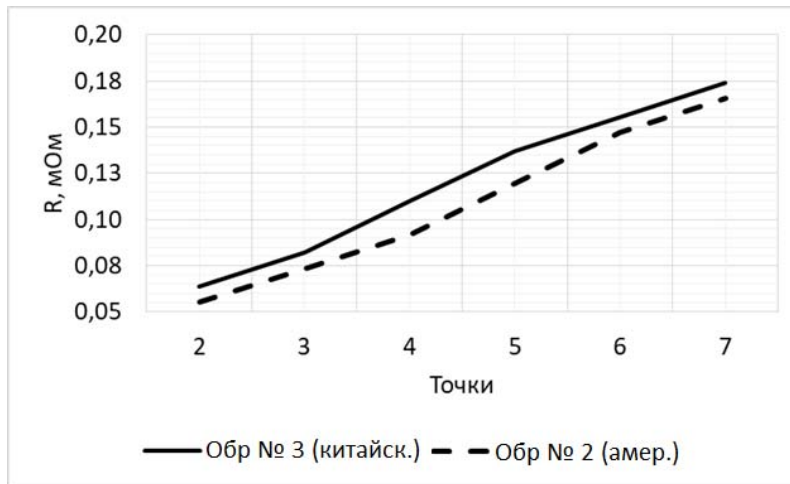
Схема измерений и применяемое оборудование аналогично предыдущей серии опытов (рис. 4).

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

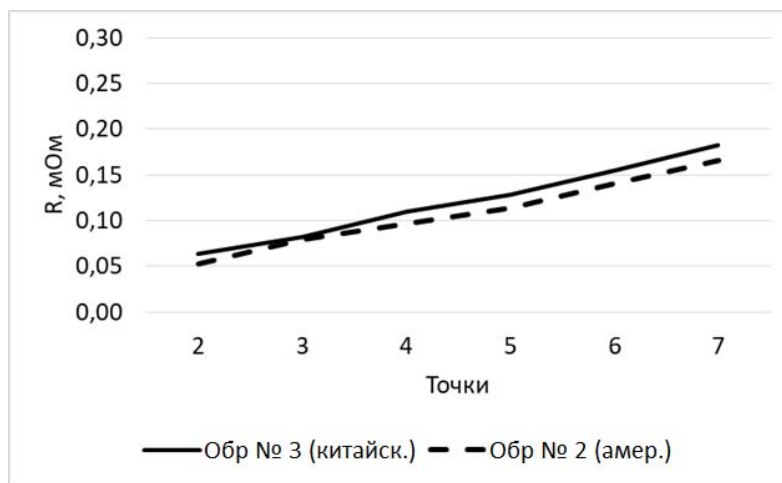
Для проведения замеров образцы помещались в шкаф, охлаждались или нагревались до заданной температуры, затем вынимались из шкафа и проводились замеры. Было проведено три серии экспериментов: при комнатной температуре, с охлажденными образцами до  $-40^{\circ}\text{C}$  и нагретыми до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Результаты измерений представлены на рис. 5–7.

Как видно из рис. 5–7, при различных температурах разница между китайским и американским ингибиторами практически незаметна. Однако, несмотря на это, было интересно рассмотреть поведение сопротивления образцов при постепенном нагревании.

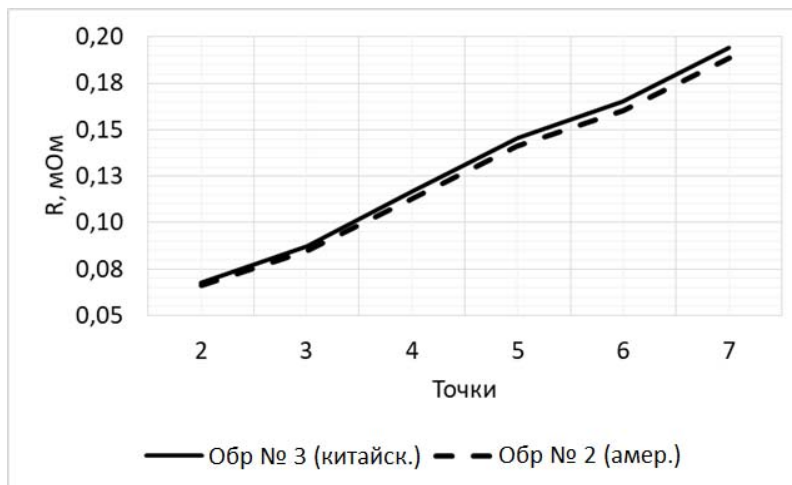
Был проведен эксперимент, в ходе которого экспериментальные образцы помещались в шкаф и подвергались постепенному нагреву с  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  градусов со скоростью нагрева



**Рис. 5.** Сопротивление между точкой 1 и другими точками при комнатной температуре, контактная поверхность шин находится между 4-й и 5-й точками.



**Рис. 6.** Сопротивление между точкой 1 и другими точками при охлаждении до температуры минус 40°C, контактная поверхность шин находится между 4-й и 5-й точками.



**Рис. 7.** Сопротивление между точкой 1 и другими точками при нагреве до температуры плюс 50°C, контактная поверхность шин находится между 4-й и 5-й точками.

60 градус/час. Образцы находились все время под напряжением, и каждые 5 градусов измерялся проходящий через них ток. В результате образец с американским ингибитором также показал немного меньшее сопротивление по сравнению с китайским.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов измерения показывает, что ингибиторы окисления резко уменьшают контактное сопротивление. Так, согласно [рис. 3](#), контактное сопротивление при



использовании американского ингибитора находится в пределах ошибки измерения, в то же время контактное сопротивление китайского составляло в первых экспериментах около 0,012 мОм. По результатам измерения, представленным на рис. 5–7, контактное сопротивление как американского, так и китайского ингибиторов не выявлено ни при комнатной, ни при пониженной, ни при повышенной температуре.

Интересно, что контактное сопротивление практически не зависит от температуры, разность контактных сопротивлений ингибированного и неингибированного образцов примерно составляет 0,03 мОм. На основе полученных данных можно оценить сэкономленные потери при использовании ингибитора окисления на одном контактном сопротивлении. Для приблизительной оценки используем формулы (2) и (3):

$$\Delta P = \Delta R I^2, \quad (2)$$

где  $\Delta R$  – разность контактных сопротивлений ингибированного и неингибированного образцов 0,03 мОм;  $I$  – ток, идущий по шине, 100 кА. Токи порядка 300 килоампер применяются в электрометаллургии, особенно цветной и при электролизе расплавов металлов:

$$\Delta W = \Delta P \times t, \quad (3)$$

где  $t$  – часы работы электроустановки, ч. Так как авторы не обладают информацией о длительности нагрузок токоведущих элементов на электрометаллургических заводах, то для оценки было взято количество часов в году, равное 8760.

Тогда сэкономленные потери  $\Delta W$  будут порядка 2,6 ГВтч. Это только на одном контакте. При большом количестве контактов экономия будет еще больше увеличиваться! Ясно, что уменьшение контактного сопротивления за счет применения ингибиторов может принести значительный экономический эффект, так как мощности, используемые при электролизе алюминия, сравнимы с мощностями ГЭС, вблизи которых построены алюминиевые заводы. Так, согласно открытым источникам, тариф на электроэнергию для Красноярского алюминиевого завода на 1-й квартал 2019 года составляет 2,61 р/кВтч (0,038 USD/кВтч). Получается, что в год экономия составит более 6,5 млн рублей (или 98 тыс. долларов США). Подчеркнем, что измерения проводились при тщательном соединении и значительном нормированном усилии сжатия контактной поверхности. При уменьшении давления сопротивление неингибированного образца будет значительно повышаться.

Дополнительно были проведены эксперименты по оценке вымываемости ингибитора из образцов. Это важно для случаев применения ингибиторов для соединения проводников наружной установки. Для этого место соединения алюминиевых шин в течение 5 минут подвергалось воздействию напора проточной холодной воды. После чего соединение разбиралось, и проверялось наличие ингибитора. Также проверялась растворимость ингибитора в воде при нормальных условиях.

По результатам трех промываний каждого образца выяснено, что ингибитор не вымывается из соединения. При этом ингибитор из-за высокой вязкости плохо смывается даже с открытой поверхности образцов. Не выявлены растворимость ингибитора в воде и соответственно скорость растворения. Следует отметить, что ингибитор не высыхает при прямом контакте с воздухом даже в течение 60 суток. Теоретически это позволяет его применять даже без защиты от воздействия внешних факторов, например, таких, как высокая влажность или дождь. Однако ингибитор является токсичным, а потому его нужно применять так, чтобы использовались меры по защите от попадания этого вещества в окружающую среду.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований показана высокая эффективность применения ингибитора окисления как средства снижения контактного сопротивления Al-Al. Ингибиторы показали заметное снижение сопротивления при различных температурах и при разной площади контакта. Приведена ориентировочная оценка экономической эффективности применения ингибитора окисления, показывающая возможность значительной экономии электроэнергии при применении ингибиторов. В целом поведение китайского ингибитора мало отличается от поведения американского.

Также отмечены высокая стойкость к смыванию ингибиторов и хорошая адгезия с металлическими поверхностями. Однако следует применять мероприятия, максимально снижающие попадание вещества в окружающую среду.

Применение ингибиторов позволит значительно повысить надежность устройств с большим количеством электрических контактов, таких, например, как проект ЧЗУ с плоским проводником [15].

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность ООО «Росмастер». Работа выполнена по инициативе предприятия и с помощью предоставленных материалов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90101.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Павлейно О.М., Павлов В.А., Павлейно М.А. *ЭОМ*. 2010, **46**(5), 56–62.
2. Beltrán-Pitarch B, Vidan F, García-Cañadas J. *Appl Therm Eng*. 2019, **165**, 114361.
3. Ólafsson, D., Vilaça, P., & Vesanko, J. *Weld World*. 2020, **64**(1), 59–71. doi:10.1007/s40194-019-00814-0
4. Oberst, M., Schlegel, S., & Großmann, S. *Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*, 14–18 September 2019, Milwaukee, WI, USA, 2019, pp. 27–35. doi:10.1109/HOLM.2019.8923935
5. Solchenbach T., Plapper P., Cai W., *J Manuf Process*. 2014, **16**, 183–189.
6. Pawlicki M., Drenger T., Pieszak M., Borowski J. *J Mater Process Technol*. 2015, **223**, 193–202.
7. Champagne Jr., Helfritsch D., Leyman P., Grendahl S. et al. *J Therm Spray Technol*. 2005, **14**(3), 330–334.
8. Goyal T., Walia R.S., Sidhu T.S. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012, **60**, 611–623.
9. Jifeng X., Shunhua C., Xiaoping B., Guowei L. et al. *Rare Metal Mat Eng*. 2014, **43**(12), 2989–2992.
10. Saeid T., Abdollah-zadeh A., Sazgari B. *J Alloy Compd*. 2010, **490**, 652–655.
11. Sivkov A.A., Shanenkova Y.L., Saygash A.S., Shanenkov I.I. *Surf Coat Technol*. 2016, **292**, 63–71.
12. Abbot W.H., Hernandez H., Kinzie R., Siejke S. *Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference*, Irvine, CA, USA, 2002, 2. P. 12D2–12D2.
13. Chudnovsky B.H. *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2005. P. 107–114.
14. Braunovic M. *IEEE Trans. Comp. Hybrids Manuf. Technol.*, 1985. Vol. 8. P. 313.
15. Илюшов Н.Я, Коробейников С.М, Ломан В.А. *Устройство защиты от высокочастотных перенапряжений*. Патент № 192615 приоритет от 19.06.19.

## Summary

A large transition resistance between conductors can cause energy losses, as well as lead to an increase in fire hazard at energy facilities. This is especially true for aluminum conductors since a strong, dielectric oxide film is formed on the aluminum surface when interacting with oxygen contained in the air. This oxide film significantly increases the transition resistance. One way to solve this problem is the use of oxidation inhibitors, which can significantly reduce contact resistance. The article presents a comparison of oxidation inhibitors from different countries of producers. The results of studies of inhibitors under the influence of high and low temperatures are also shown. Rather high efficiency of inhibitors is shown as a means of reducing the transition resistance.

*Keywords:* aluminum, electrical contact, aluminum oxidation, oxidation inhibitor, energy losses, transient resistance, high temperatures, low temperatures