

## Охлаждаемые контактные соединения

Н. Н. Дзекцер, Е. С. Рублева, Ю. С. Висленев\*

ООО "Системы энергоэкологической безопасности", г. Санкт-Петербург,  
Россия, e-mail: [eec@sp.ru](mailto:eec@sp.ru)

\*ЦНИИСЭТ, г. Санкт-Петербург, Россия

*Одним из путей повышения электрической проводимости токопроводов является снижение активного сопротивления проводниковых материалов при использовании водяного или криогенного охлаждения. Применение водяного охлаждения дает возможность увеличить мощность и повысить токи генераторов и электрических аппаратов в 4—5 раз по сравнению с устройствами, имеющими естественное воздушное охлаждение. На основе анализа физико-механических свойств и микрогеометрии контакт-деталей получены зависимости переходного сопротивления одно- и многоточечных контактов при криогенной и комнатной температурах от различных факторов. Указаны пути оптимизации охлаждаемых контактов.*

**Ключевые слова:** *контактное соединение, водяное охлаждение, криогенная температура, переходное сопротивление, твердость контакт-детали, температурный коэффициент электрического сопротивления, нагрузка.*

Развитие промышленной энергетики характеризуется непрерывным ростом мощности электроустановок и, соответственно, увеличением их номинальных токов. Если еще недавно эти токи не превышали нескольких тысяч ампер, то теперь они измеряются сотнями тысяч и имеют тенденцию к дальнейшему росту. В этой связи в настоящее время наряду с техникой высоких напряжений возникает техника больших токов. Эта тенденция наиболее проявляется в электролизном производстве цветных металлов (алюминия, меди, никеля и др.), а также продуктов химической промышленности: потребляемые мощности современных электролизных заводов измеряются сотнями и тысячами мегаватт. Изложенное требует проведения технических мероприятий, направленных на улучшение энергетических показателей всех звеньев производства, в том числе и устройств передачи и преобразования энергии.

Построение схемы электроснабжения промышленного предприятия определяется в основном мощностью и взаимным расположением потребителей и источников питания. Исходя из этого, распределительные сети на территории промышленных предприятий выполняют воздушными или кабельными линиями и токопроводами.

Токопроводы обеспечивают подключение электроприемников в любой точке и при определенных условиях на любом этапе строительства и эксплуатации предприятия. Если в начальном периоде развития токопроводы использовали исключительно для питания отдельных потребителей (например, преобразовательных подстанций электролизных установок), то теперь область их применения значительно расширена: токопроводы питают подстанции, печные установки, группы потребителей металлургического, химического и других производств.

Одним из путей повышения проводимости токопроводов является снижение активного сопротивления проводниковых материалов при использовании водяного и криогенного охлаждения [1]. Применение водяного охлаждения дает возможность увеличить мощности и повысить токи генераторов и электрических аппаратов в 4—5 раз по сравнению с электротехническими устройствами, имеющими естественное воздушное охлаждение. При изготовлении токопроводов водяное охлаждение способствует в одних случаях уменьшению расхода металла, в других — уменьшению потерь электроэнергии. Широкое применение водяного охлаждения вызвано успехами по химической очистке воды ионитовыми фильтрами, в результате чего электрическое сопротивление воды повысилось практически до сопротивления диэлектриков.

Целесообразность создания криогенного направления в энергетике определяется следующими факторами: величиной требуемых капиталовложений, потерями мощности в токоведущих элементах и затратами мощности на их охлаждение, надежностью работы сверхпроводящих устройств и вспомогательного оборудования.

Проводимость металлического контакта, свободного от поверхностных пленок, зависит от изменения температуры: с ее уменьшением снижается удельное сопротивление материалов контактирующих деталей, изменяются механические свойства контактов, в частности твердость.

Рассмотрим электрическое сопротивление одноточечного контакта.

Переходное сопротивление одноточечных контактов определяется по формуле [2]

$$R = \frac{\rho}{2a}. \quad (1)$$

Диаметр контактного пятна при пластической деформации микронеровностей

$$2a = \sqrt{\frac{4N}{(\pi H_{\mu})}}, \quad (2)$$

где  $N$  — контактное нажатие;  $H_{\mu}$  — микротвердость контакт-деталей.

Принимая  $H_{\mu} \approx c\sigma_s$  и  $c \approx 3$ , получаем

$$2a = \sqrt{\frac{4N}{(\pi c \sigma_s)}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести материала контакта.

Подставляя соотношение (3) в формулу переходного сопротивления, находим зависимость переходного сопротивления одноточечных контактов от физико-механических и электрических свойств контактных элементов:

$$R_{\text{пер}} = \rho \sqrt{\frac{\pi c \sigma_s}{4N}}. \quad (4)$$

Выполненные исследования показали, что до температуры примерно 50—60 К удельное электрическое сопротивление можно определить как

$$\rho_t = \rho_{293 \text{ К}}(1 - a'\Delta\theta), \quad (5)$$

где  $\rho_{293\text{ К}}$  — удельное электрическое сопротивление при  $\theta = 293\text{ К}$ ;  $\alpha'$  — температурный коэффициент электрического сопротивления;  $\Delta\theta = 293 - \theta_{\text{кр}}$ ;  $\theta_{\text{кр}}$  — температура, при которой работают соединения.

При температуре ниже 50 К изменение сопротивления можно описать уравнением

$$\rho_t = a_1 + a_2\theta^2 + a_3\theta^5, \quad (6)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  — константы.

В выражении (6)  $a_2\theta^2$  характеризует взаимодействие электронов, а  $a_3\theta^5$  — взаимодействие электрона с решеткой.

Температурная зависимость предела текучести в общем случае имеет вид

$$\sigma_s = \sigma_{s\ 293\text{ К}}(1 + \beta_{\text{тек}}\Delta\theta), \quad (7)$$

где  $\beta_{\text{тек}}$  — температурный коэффициент предела текучести ( $\beta_{\text{тек Al}} = 9 \cdot 10^{-4}$ ;  $\beta_{\text{тек Cu}} = 45 \cdot 10^{-4}$ ).

Подставляя в соотношение (4) значения  $\rho_t$  из выражений (5) и (6) и  $\sigma_s$  из формулы (7), после некоторых преобразований получаем зависимость  $R_{\text{пер}}$  от различных параметров контактного соединения. При температуре до 50 К эта зависимость имеет вид

$$R_{\text{пер}} = 3,45\rho_{293\text{ К}}(1 - \alpha'\Delta\theta) \sqrt{\sigma_{s\ 293\text{ К}}(1 + \beta_{\text{тек}}\Delta\theta)}. \quad (8)$$

Здесь нагрузка принята равной 2 Н.

Типичные значения расчетных параметров для медного и алюминиевого одноточечных контактов приведены в таблице.

По аналогии с одноточечным контактом отношение переходных сопротивлений контактных соединений шин (многоточечных контактов) при криогенной и комнатной температурах можно выразить как

$$\frac{R_{\text{пер кр}}}{R_{\text{пер}}} = \frac{\rho_{\text{кр}}}{\rho_{293\text{ К}}} \cdot \frac{H_{\mu\ \text{кр}}}{H_{\mu\ 293\text{ К}}}. \quad (9)$$

#### Расчетные параметры для медного и алюминиевого одноточечных контактов

$\theta, \text{ К}$	$\rho_t \cdot 10^5, \text{ Ом}\cdot\text{мм}$	$\sigma_s, \text{ кПа}$	$R_{\text{пер кр}} \cdot 10^5, \text{ Ом}$	$\frac{R_{\text{пер кр}}}{R_{\text{пер}}}$
4	$\frac{0,004}{0,0034}$	$\frac{8,82}{34,30}$	$\frac{0,04}{0,07}$	$\frac{0,002}{0,003}$
77	$\frac{0,39}{0,27}$	$\frac{8,23}{29,40}$	$\frac{3,9}{5,1}$	$\frac{0,147}{0,225}$
200	$\frac{1,8}{1,06}$	$\frac{7,45}{20,97}$	$\frac{17,2}{16,9}$	$\frac{0,647}{0,744}$
293	$\frac{2,9}{1,7}$	$\frac{6,86}{14,70}$	$\frac{26,6}{22,7}$	$\frac{1,00}{1,00}$

Примечание: в числителе приведены параметры для алюминия, в знаменателе — для меди.

На основе выполненных исследований установлено следующее.

Переходное сопротивление  $\frac{R_{\text{перкр}}}{R_{\text{пер}}}$  контактных соединений медных шин при 77 К составляет 0,13—0,15;  $R_{\text{пер } 4,2 \text{ К}}/R_{\text{пер } 293 \text{ К}} = 0,003$ ; для алюминиевых шин эти соотношения равны:  $R_{\text{пер } 77 \text{ К}}/R_{\text{пер } 293 \text{ К}} = 0,14$ ;  $R_{\text{пер } 4,2 \text{ К}}/R_{\text{пер } 293 \text{ К}} = 0,001$ ; для шин из алюминиевого сплава АД31Т1  $R_{\text{пер } 77 \text{ К}}/R_{\text{пер } 293 \text{ К}} = 0,13—0,15$ ;  $R_{\text{пер } 4,2 \text{ К}}/R_{\text{пер } 293 \text{ К}} = 0,001$ .

При увеличении нагрузки от 3 до 24 кН переходное сопротивление медных контактов уменьшается в 2 раза при температуре 293 К, при температуре 77 К — в 6 раз, алюминиевых — соответственно в 2 и 4 раза.

С увеличением твердости НВ контактных элементов от 25 до 450 МПа переходное сопротивление возрастает при температуре 293 К в 2, при 77 К — в 3 раза.

Оптимальная чистота обработки соприкасающихся поверхностей традиционных и криогенных контактов оценивается по пятому—седьмому классу.

1. Дзекцер Н. Н. Многоамперные контактные соединения / Н. Н. Дзекцер, Ю. С. Висленев. — Л. : Энергоатомиздат, Л. О., 1987. — 127 с.
2. Хольм Р. Электрические контакты. — М. : ИЛ, 1961. — 461 с.

### Охолоджувальні контактні з'єднання

М. М. Дзекцер, Е. С. Рубльова, Ю. С. Висленев

*Одним із шляхів підвищення електричної провідності токопроводів є зниження активного опору провідникових матеріалів при використанні водяного або криогенного охолодження. Застосування водяного охолодження дає можливість збільшити потужність і підвищити струми генераторів і електричних апаратів в 4—5 разів у порівнянні з пристроями, що мають природне повітряне охолодження. На основі аналізу фізико-механічних властивостей і мікрогеометрії контакт-деталей отримано залежності перехідного опору одно- і багатоточкових контактів при криогенній і кімнатній температурах від різних факторів. Вказано шляхи оптимізації охолоджуваних контактів.*

**Ключові слова:** контактне з'єднання, водяне охолодження, криогенна температура, перехідний опір, твердість контакт-деталі, температурний коефіцієнт електричного опору, навантаження.

### Cooled contact connections

N. Dzektser, E. Rublev, Y. Vislenev

*One of the methods for electrical conductivity of current-conducting wires is decreasing the conductor materials' active resistance using water or cryogenic cooling. Use of water cooling allows for increasing power and currents of generators and electric apparatuses 4—5 times compared to devices with natural air cooling. Dependencies of single-point and multi-point contacts from various factors at cryogenic and room temperatures are obtained based on the physical and chemical properties of the contact parts, as well as micro-geometry analysis. The methods of cooled contact optimization are indicated.*

**Keywords:** contact joint, water cooling, cryogenic temperature, contact resistance, hardness contact detail, temperature coefficient of electric resistance, load.