

УДК: 621.336

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД – ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА» НА ЕГО РЕСУРС

Устименко Д.В., Муха А.Н.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE TEMPERATURE OF THE HEATING OF THE SLIDING CONTACT «CONTACT WIRE - INSERT OF CURRENT» ON ITS RESOURCE

Ustymenko D., Mukha A.

В статье рассматривается вопрос сохранения работоспособности и ресурса электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника». Приведенные результаты стендовых испытаний электрического скользящего контакта, образованного медным контактным проводом МФ-100 и различными типами контактных вставок, на основе которых четко прослеживается зависимость температуры зоны контакта и его износа. Полученные результаты могут быть использованы для получения прогнозной модели скользящего контакта.

Ключевые слова: контактный провод, прочность, термостойкость, стендовые испытания, износ

Вступление. В наземном электрическом транспорте очень распространенной схемой передачи энергии на борт есть применение силового скользящего контакта. Данный тип контактов состоит из контактного провода и токосъемных элементов, установленных на полозах токоприемников электроподвижного состава. Условия работы скользящего силового контакта являются особенно сложными и характеризуются широким диапазоном температур окружающей среды, наличием осадков в виде дождя и снега, отложений гололеда и изморози, загазованностью окружающей атмосферы и т.д.

Провода, используемые для контактной сети, при изготовлении протягивают в холодном состоянии, что приводит к увеличению временного сопротивления разрыву и уменьшению пластичности [1]. При нагревании провод утрачивает эти качества и тем больше, чем выше температура и время ее воздействия. Потеря прочностных качеств так или иначе связана со сроком службы контактного провода. Поэтому в соответствии с нормами [2] температура проводов контактной сети в самых неблагоприятных

условиях не должна превышать предельно допустимого значения.

Решению проблемы повышения эксплуатационных свойств контактных проводов и вставок токоприемников уделяется достаточного много внимания. Свойства любого электрического контакта определяются: величиной площади контакта, качеством контактной поверхности и контактным давлением. Из литературы известно [3], что фактическая площадь контакта составляет незначительную долю видимой площади соприкосновения. Таким образом, дискретный характер соприкосновения твердых тел является основной причиной повышенного электрического сопротивления между контактирующими плоскостями. Одна из особенностей скользящего электрического контакта «контактный провод – вставка токоприемника» состоит в относительно больших величинах токов при довольно малых силах контактного нажатия. Все вместе приводит к выделению большого количества тепла в областях соприкосновения [4, 5]. Что в свою очередь вызывает различного рода деградации: рекристаллизационный отжиг, размягчение металла, плавление, кипение и дугообразование.

В ряде работ показана низкая термостойкость безстыковых медных контактных проводов и потеря ими механических свойств уже при температурах 100°C и выше, и как решение предлагается использовать контактные провода, изготовленные из магнито-бронзы [6, 7]. Для улучшения качества токосъема предлагается также увеличивать натяжение контактного провода (до 20...30 кН), без снижения их износо- и термостойкости, и повышения электрического сопротивления, что может быть достигнуто легированием материала проводов или переходом на биметаллические контактные провода [8].

Кроме того, позитивный эффект может дать использование в качестве материала вставок токоприемников электропроводных композитов, обладающих эффектом самосмазывания и образующих в процессе работы на поверхности контактного провода тонкую защитную токопроводящую пленку [9].

Целью работы является анализ причин и факторов, приводящих к повышенному нагреву скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника», а также их влияния на работоспособность и ресурс данного узла.

Изложение основного материала.

Считается, что износ контактных вставок токоприемников и контактного провода состоит из механической и электрической составляющих [3]. На сегодня детально рассмотрен широкий круг моделей трибологических систем (трение без передачи электрического тока) и разработана система показателей контактного взаимодействия, а также методов их определения. Введены геометрические характеристики поверхностей – макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрошероховатость; характеристики площадей касания – видимая, контурная, фактическая; типы контактов – упругий, упруго-пластичный, пластичный и т.д. Учет же электрической составляющей во много зависит от определения фактической площади контакта и его переходного электрического сопротивления. Теоретическое решение задачи о фактической площади касания реальных поверхностей весьма затруднительно, поэтому широкое распространение при определении сопротивления электрических скользящих контактов твердых тел получили экспериментальные методы.

Известно, что повышение температуры приводит к ухудшению механических свойств проводниковых материалов (рис. 1), изменение которых сильно зависит от продолжительности нагрева [10]. Медленный (в течении 2 часов) нагрев твердотянутой меди (кривая 2) приводит к резкому уменьшению предела прочности на растяжение $\sigma_{м.рас}$ при более низкой температуре, чем при их кратковременном (в течении 10 секунд) нагреве (кривая 1). Медленный нагрев твердотянутого медного стержня диаметром 50 мм (кривая 3) приводит к рекристаллизации стержня в зоне $T=200^{\circ}\text{C}$ и далее к быстрому уменьшению его прочности до уровня прочности такого же стержня из мягкой меди (кривая 4) в зоне $T=300^{\circ}\text{C}$.

Величина энергии, выделяемая в контактной паре «контактный провод – вставка токоприемника» может быть определена следующим образом:

$$W = W_m + W_э, \quad (1)$$

где W_m – механическая составляющая выделяемой в скользящем электрическом контакте энергии, Дж;

$W_э$ – электрическая составляющая выделяемой в скользящем электрическом контакте энергии, Дж;

$$W_m = \mu F V t, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения;

F – контактное нажатие, Н;

V – скорость движения контактной вставки относительно контактного провода, м/с;

t – время прохождения тока через скользящий контакт, с.

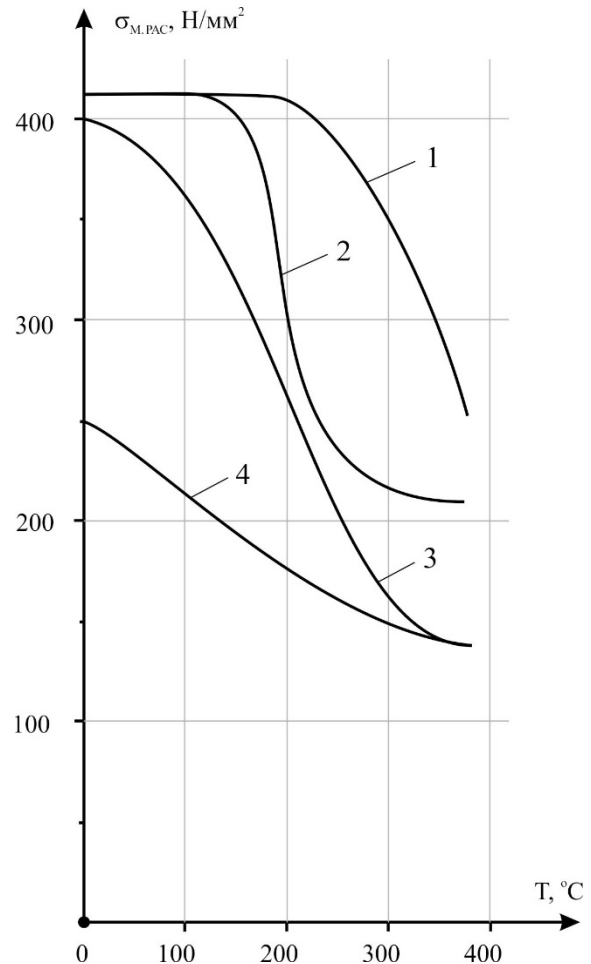


Рис. 1. Изменение механических свойств проводниковых материалов в зависимости от температуры и времени нагрева – для твердотянутой медной проволоки при ее быстром (1) и медленном (2) нагреве; 3 – для твердотянутого медного стержня диаметром 50 мм при медленном нагреве; 4 – то же для стержня из мягкой меди

При движении токоприемника точка контакта постоянно перемещается в пространстве со скоростью движения локомотива, поэтому для описания процессов, происходящих в движении, рассматривается часть контактного провода длиной равной ширине токосъемной пластины.

$$W_э = I^2 R t, \quad (3)$$

где I – сила тока, протекающего через скользящий электрический контакт, А;

R – сопротивление контактной пары, Ом.

Сопротивление контактной пары является функцией температуры и зависит от времени постольку, поскольку температура контактного провода в неустановившемся режиме есть функция времени.

В условиях отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Унификация и надежность электрооборудования подвижного состава» ДНУЖТ им. академика В. Лазаряна были проведены стендовые испытания контактной пары «контактный провод – вставка токоприемника» на износ с одновременным контролем температуры в зоне скользящего контакта, результаты представлены в табл.

Таблица

Результаты стендовых испытаний скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника» со вставками различного типа

Тип контактной вставки	Установившееся значение температуры T, °C	Средний износ контактного провода, мм	Состояние поверхности контактного провода
РОМАНИТ-УВЛШ	35...45	0,01	Равномерный износ без видимых повреждений и задиrow
ВЖ-3П (со свинцовой пропиткой)	45...75	0,027	Равномерный износ без видимых повреждений и задиrow
ГЛОРΙΑ	360*	0,1356	Борозды и многочисленные задиrow, следы побелостей в результате действия значительной температуры
Графит тип А	220...230	0,0515	Имеет задиrow и видимые повреждения, изменения цвета
Графит тип Б	150...160	0,059	Имеет задиrow и видимые повреждения

* – температура превысила пределы измерения тепловизора

Стендовые испытания проводились на кольце эллипсовидной формы, которое изготавливается из медного контактного провода МФ-100 ГОСТ 2584 [2]. При этом с контактным проводом взаимодействует два образца, которые изготавливаются из вставки соответствующего типа длиной 80±2 мм и шириной 30±1 мм каждая, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 32680 [11].

Условия проведения стендовых испытаний:

- ток 300 А;
- линейная скорость в скользящем контакте 4,83 м/с (поддерживается автоматически);
- имитируется 10000 проходов вставки по контактному проводу;
- контактное нажатие 40 Н.

В процессе проведения испытаний при помощи тепловизора Testo 875 регистрируется температура в зоне контакта (рис. 2).

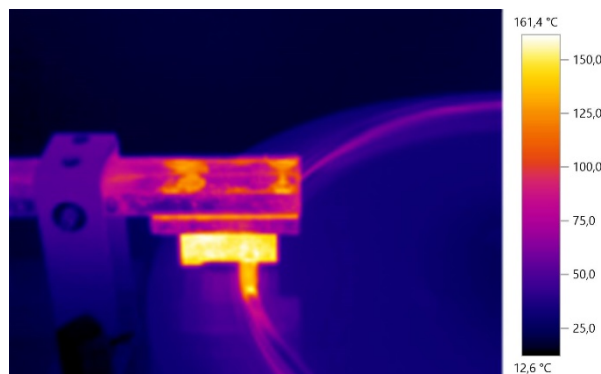


Рис. 2. Термограмма зоны скользящего контакта

При этом такие термограммы объекта регистрируются с заданной периодичностью. Анализируя полученные данные при помощи программного обеспечения IrSoft строят кривые нагревания элементов скользящего контакта (рис. 3).

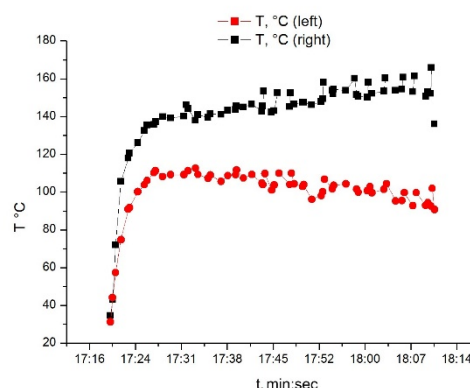


Рис. 3. Кривая нагревания скользящего контакта

Результаты, приведенные в табл. 1 позволяют установить связь между температурой скользящего контакта и износом: более высокая температура, являясь следствием большего переходного сопротивления контакта есть тем ключевым фактором, который определяет работоспособность и ресурс данного узла. Для того чтобы ответить на вопрос о ресурсе и работоспособности не только качественно, но и количественно потребуются ввести некий интегральный показатель, отражающий как механические, так и электрические факторы, действующие в контакте. Используя который можно построить прогнозную модель для электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника».

Выводы

По результатам стендовых испытаний установлено, что переходное омическое сопротивление электрического скользящего контакта «контактный провод – вставка токоприемника» его температура и

износ взаимосвязаны. Наибольшая температура в зоне контакта наблюдалась графитовыми вставками, причем ее величина значительно превосходит предельно допустимую для контактного провода. В результате действия высоких температур материал контактного провода теряет свои механические свойства, что отрицательно сказывается на его ресурсе.

Значительно лучше себя показали более современные материалы, применение самосмазывающихся материалов с низким удельным электрическим сопротивлением и низким коэффициентом трения позволило удержать температуру контакта на достаточно низком уровне износ контактного провода при этом также оказался минимальным.

Полученные результаты при соответствующей математической обработке могут быть положены в основу прогнозной модели для электрического скользящего контакта такого типа.

Л и т е р а т у р а

1. Марквардт К.Г. Учебник для вузов ж.-д. транспорта: Контактная сеть. / К. Г. Марквардт, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 335с.
2. Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия: ГОСТ 2584-86. – [действует от 1988-01-01]. – М.: ИПК изд. стандартов, 1998. – 9с. – (Межгосударственный стандарт).
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.
4. Паранин А. В. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении / А. В. Паранин Н. А. Акиншин, А. Б. Батрашов // Транспорт Урала. – 2013. – №4(39). С. 93–96.
5. Baliichuk O. Y. Influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing / O. Y. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. L. Marenych, D. V. Ustymenko. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2017. – №2 (68). С. 81–91.
6. Берент В.Я. Совершенствование проводов контактной сети // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – Вып. 3. С. 40-45.
7. Гершман И. С., Миронос Н. В. Требования к контактными проводам для высокоскоростного железнодорожного транспорта // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – №3. С. 13–17.
8. Яндович В. Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема / В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, А. В. Антонов // Электрифікація транспорту. – 2014. – № 7. С. 67–77.
9. Ustymenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018. – №3 (75). С. 78–86.
10. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.; под ред. проф. Г.Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ/ – 2000. 540с.
11. Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические усло-

вия: ГОСТ 32680-2014. – [действует от 2015-09-01]. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16с. – (Межгосударственный стандарт).

R e f e r e n c e s

1. Markvardt K.G. Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta: Kontaktnaya set'. / K. G. Markvardt. 4-e izd., pe-rerab. i dop. – М.: Transport, 1994. – 335s.
2. Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov. Tekhni-cheskie usloviya: GOST 2584-86. – М.: IPK izd. standartov, 1998. – 9s.
3. Khol'm R. Elektricheskie kontakty. / R. Khol'm – М.: Inostrannaya literatura Publ., 1961. – 480 p.
4. Paraniin A. V. Eksperimentalnoe issleovanie raboty elektricheskogo kontakta «kontaktniy provod – tokosyemnaya plastina» v staticheskom polozhenii / A. V. Paraniin, N. A. Akinshin, A. B. Batrashov // Transport Urala. 2013. № 4 (39). – P. 93–96.
5. Baliichuk O. Y. Influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing / O. Y. Baliichuk, L. V. Dubynets, O. L. Marenych, D. V. Ustymenko. Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznchnogo transportu. 2017. – №2 (68). С. 81–91.
6. Berent V.YA. Sovershenstvovanie provodov kontakt-noj seti // Vestnik VNIIZHT. – 2012. – Vyp. 3. P. 40-45.
7. Gershman I. S., Mironos N. V. Trebovaniya k kontaktnym provodam dlya vysokoskorostnogo zhelezno-dorozhnogo transporta // Vestnik VNIIZHT. – 2011. – №3. S. 13–17.
8. YAndovich V. N. Sravnitel'nyj analiz kontaktnyh podvesok v stranah Evrosoyuza i Ukrainy: organi-zaciya nadezhnogo tokos"ema / V. N. YAndovich, V. G. Sychenko, A. V. Antonov // Elektrifikaciya trans-portu. – 2014. – № 7. S. 67–77.
9. Ustymenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznchnogo transportu. 2018. – №3 (75). С. 78–86.
10. Teoriya ehlektricheskikh apparatov: Uchebnik dlya vu-zov / G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, G.S. Kaplan i dr.; pod red. prof. G.N. Aleksandrova. 2-e izd., pe-rerab. i dop. – SPb.: Izd-vo SPbGTU/ – 2000. 540s.
11. Tokosemnye elementy kontaktnye tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya: GOST 32680-2014. – М.: Standartinform, 2016. – 16 s.

Устименко Д.В., Муха А.Н. Аналіз впливу температури нагрівання ковзного контакту «контактний провід – вставка струмоприймача» на його ресурс.

В статті розглядається питання збереження працездатності та ресурсу електричного ковзного контакту «контактний провід – вставка струмоприймача». Наведені результати стендових випробувань електричного ковзного контакту утвореного мідним контактним проводом МФ-100 та різними типами контактних вставок, на основі яких чітко просліджується залежність температури зони контакту і його зносу. Отримані результати можуть бути використаними для отримання прогновної моделі ковзного контакту.

Ключові слова: контактний провід, міцність, термостійкість, стендові випробування, знос.

Ustymenko D.V., Mukha A.M. Analysis of the effect of the temperature of the heating of the sliding contact «contact wire – insert of current» on its resource.

The article discusses the issue of preserving the working capacity and resource of the electrical sliding contact «contact wire - insert current collector». The results of bench testing of an electric sliding contact, formed by the MF-100 copper contact wire and various types of contact inserts, on the basis of which the dependence of the contact zone temperature and its wear is clearly traced. The results can be used to obtain a predictive model of a sliding contact.

Keywords: contact wire, strength, thermal stability, bench testing, wear

Устименко Д.В. – к.т.н., доцент, докторант кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, e-mail: ustimenko.1979@gmail.com
Муха А.М. – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, e-mail: mukha.andrii@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана: 11.11.2018.