

УДК 621.332.35.32

Электроэрозия электрических контактов

В. Я. БЕРЕНТ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. В результате нарушения непосредственного взаимодействия между контактами возникают электрические разряды. В результате их воздействия происходит электрическая эрозия контактов. Рассмотрены контакты матричного типа, рекомендации по их составу, характер их повреждаемости. Исследованы разрушения углеродных материалов от дуговых разрядов. Показана более высокая эрозионная стойкость металлоуглеродных вставок перед угольными. Подтверждена положительная роль легкоплавкой фазы в составе контактов каркасного вида при воздействии электрической дуги. Рассмотрены эрозионные повреждения контактов при токосъеме токов высокой плотности.

Ключевые слова: электрическая эрозия; электрическая дуга; контакты матричного вида; контакты каркасного вида; угольные вставки; металлоуглеродные вставки; порошковые контактные пластины; легкоплавкая составляющая композиция контакта

Введение. Контактный провод электрифицированных железных дорог и токосъемные элементы полюсов токоприемников работают в атмосферных условиях, часто сопровождающихся нарушением их взаимодействия. При этом между ними возникают электрические разряды, повреждающие их. Электрические разряды, сопровождающиеся возникновением электрических дуг, часто проявляются и при работе коммутационных контактов.

Значительное количество повреждений компонентов сильноточного скользящего контакта и коммутационных контактов электрическими разрядами, неизбежно возникающими при токосъеме даже при плотном контакте, но снятии высоких плотностей токов, послужило основанием для исследований этого процесса, выявления природы происходящих повреждений. Тщательного изучения требуют достаточно сложные процессы, связанные с прохождением тока через контакты, а также процессы, сопровождающие эрозию.

При этом надо учитывать, что эрозия контактов определяется преимущественно термическим действием дуги. Она зависит от выделяющейся на электродах энергии, а следовательно, от количества электричества, протекающего в дуге. Эрозия возрастает линейно с током. Условия зажигания и гашения электрических дуг определяются их характеристиками для каждого материала контактов, так как для каждого из

металлов существуют определенные минимальные значения напряжения и тока возникновения дуги.

Воздействие электрических дуг на контакты выявило три механизма их разрушения при электроэрозии. Это испарение, разбрызгивание расплавленного металла и химические процессы, связанные с взаимодействием материала контактов с элементами окружающей среды, и разрушение образовавшихся пленок при термическом воздействии.

Чтобы обоснованно выбрать материалы для скользящих и коммутационных контактов, требуется проанализировать исследования в этой области, изучить и оценить эксплуатационные повреждения и отказы существующих материалов, исследовать явления, происходящие в материале контактов при воздействии электрических разрядов и прохождении электрического тока.

Виды электрических контактов, их состав и структурное построение, связанное со снижением их электроэрозии. Практика использования различных материалов для электрических контактов показала, что по своему построению они могут быть каркасного или матричного типа.

Однородные сплавы на базе твердых растворов в контактах применяются реже, чем многофазные композиционные материалы.

При создании материалов для контактов с гомогенной структурой авторы работы [1] рекомендуют легировать металлическую основу контактов компонентами, снижающими температуру кипения сплава. Более интенсивное испарение компонента, имеющего более низкую температуру кипения (например, Zn в Cu), как показано в работе [2], приводит к обогащению контактной поверхности элементом, имеющим более низкую температуру кипения. Снижение эрозии при этом объясняется уменьшением теплового потока к поверхности контактов от возрастания потерь тепловой энергии на испарение [3].

Положительное влияние легколетучих составляющих на снижение электрической эрозии подтверждается исследованиями [4], в которых считается, что желателен такой материал катода, в котором имелись бы низкокипящие компоненты, но и чтобы теплота испарения их была достаточно высокой.

Так как эрозия происходит преимущественно за счет распыления частиц твердого материала

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (В. А. Берент)



Рис. 1. Рельефная структура углеродного материала в донной части кратера после воздействия электрической дуги
Fig. 1. Relief structure of the carbon material in the bottom part of the crater after exposure to the electrical arc

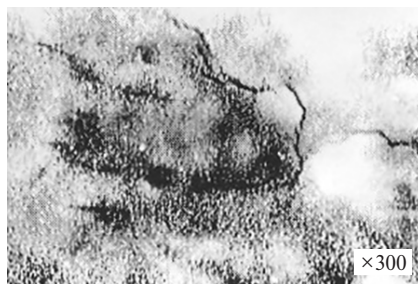


Рис. 2. Оплавленный характер боковых поверхностей кратера углеродного материала
Fig. 2. Melted nature of side surfaces of the carbon material of the crater



Рис. 3. Полые сферические выделения углеродного материала, часто лопнувшие по краям лунки кратера от воздействия дуги
Fig. 3. Hollow spherical extractions of carbon material, often burst at the edges of the crater holes due to the arc exposure

(испарение, разбрызгивание), то она уменьшается с увеличением твердости металла контактов и температуры его плавления и кипения, а следовательно, определяется только прочностью связи между частицами в нем [5].

Прочностные характеристики сплавов как при комнатной, так и при более высокой температуре определяются прочностью межатомных связей в кристаллической решетке. Величина модуля упругости характеризует прочность межатомного взаимодействия, а чтобы повысить модуль упругости, необходимо провести легирование металла контакта [6]. При разработке токоъемных элементов матричного типа следовали этому направлению, упрочняя медную основу контакта легированием.

Упрочнение и повышение термостойкости медной матрицы контакта осуществляли не только созданием твердых растворов, но и методом дисперсионного упрочнения меди [7]. Все электротехнические сплавы с электропроводностью 65–85% электропроводности меди в виде твердых растворов и сплавов меди, подвергающиеся дисперсионному твердению, способны быть устойчивыми к процессу рекристаллизации при нагреве до температур 400–560 °С. Дисперсное упрочнение меди позволяет обеспечить повышение температуры рекристаллизации до 820–850 °С при сохранении электропроводности 90–92% электропроводности меди.

Всеми исследователями эрозии отмечается различие в износе и повреждаемости композиционных и однородных, гомогенных материалов контактов [8, 9, 10]. Несовместимое сочетание свойств у материалов контактов достигается при многофазном их исполнении посредством использования технологии порошковой металлургии при их изготовлении. Гетерогенная структура таких материалов, представляющая собой смесь отдельных фаз с различными свойствами, позволяет на основе аддитивности получить композит с набором противоречивых свойств [8, 11, 12, 13].

Для сильнотоочных контактов применяют тугоплавкую матрицу — каркас, а для придания ей необходимых электрических и теплопроводных свойств в ней размещают менее тугоплавкую фазу с соответствующими свойствами. В данном случае проявляется положительная роль гетерогенной структуры композиционных материалов, так как в опорной точке дуги потери тепловой энергии происходят от нагрева, плавления, кипения и испарения легкоплавкой фазы, а тугоплавкий каркас затрудняет выброс жидкой фазы [14], удерживая ее в порах силами поверхностного натяжения [8]. Тугоплавкая матрица при этом сохраняется и мало теряет свою прочность благодаря поглощению тепла за счет испарения более легкоплавкого компонента. От самых разогретых фаз композита происходит отвод тепла к компонентам с большей теплопроводностью, которые и являются более легкоплавкими. В результате происходит рассредоточение тепловых потоков, исходящих из опорной точки дуги. От тепловой энергии дуги на композиционных материалах не образуются макрованны расплавленного металла из-за сохранности тугоплавкого каркаса, а на однофазном металле образуется сплошная ванна, из которой происходит выброс капель металла.

Рекомендации по созданию материала с углеродной матрицей для контактных вставок на основе исследований их повреждаемости при дуговых разрядах. Учитывая приведенные закономерности поведения материалов контактов при воздействии на них электрических разрядов, проводились разработка материалов токоъемных элементов полозов токоприемников и исследование процессов, сопровождающих их эрозию.

При разработке углеродного материала для токоъемных элементов уделялось внимание процессам, протекающим в них при действии электрических дуг. Для этого проводились исследования повреждаемости и структурных изменений углеродных материалов в различных частях кратера, образовавшегося в опорной точке электрической дуги. По состоянию углеродных материалов на различных участках

поверхности кратера можно судить о процессах, протекающих в них. Установлено три вида состояния поверхности кратера с совершенно различными структурами, каждая из которых связана с особенностью процессов, происходящих на его поверхности.

В донной части кратера обнаруживается мелко-рельефная структура, образующаяся в результате выгорания более летучих компонентов, связующих, обожженных углеродных материалов. Чешуйчатая структура углеродных материалов в донной части кратера обусловлена высокой температурой электрической дуги ($3000–5000^{\circ}\text{C}$), вызывающей их сублимацию (2100°C при давлении 1 кгс/см^2), и отсутствием воздушных потоков в этой части поражения материала дугой (рис. 1).

Боковые поверхности кратера имеют совершенно другую структуру: они более гладкие, поверхность их носит оплавленный характер (температура плавления углерода 3500°C при давлении 100 кгс/см^2), что связано с потоками разогретых газов, вырывающихся из кратера (рис. 2).

Краевые участки кратера, не подверженные воздействию газовых потоков и в то же время находящиеся под влиянием высоких температур (у поверхности на угловом участке теплоотвод затруднен), покрыты полыми сферическими выделениями углеродного материала, часто лопнувшими (рис. 3). Вблизи вырывающихся струй газов и паров из кратера в зоне разряжения беспрепятственно при высоких температурах может происходить формирование шарообразных полых королек углерода, выдуваемых газами, выделяющимися из материала. На корольках выделяется также сублимированный в кратере углерод. Подтверждением сказанного выше является выделение королек в трещинах, где отсутствуют потоки струй паров и газов.

Проведенные исследования позволили наметить пути по снижению разрушающего действия электрических разрядов. Так, осуществление направленного теплоотвода от опорной точки дуги позволило бы уменьшить разрушение материала от ее тепловой

энергии. При этом разрушающее действие дуги в значительной степени определяется как теплопроводностью самого материала, так и его пористостью, так как воздух пор препятствует теплоотводу. В связи с этим проводились исследования теплоемкости и теплопроводности углеродных материалов различной природы на автоматическом сканирующем калориметре КСИТ-1300. В калориметре использовался метод плоского теплового источника в стационарном и динамическом тепловом режиме. Теплопроводность углеродных материалов токосъемных вставок марки О, А, Б определялась в сравнении с металлоуглеродными вставками фирм Schunk, Ringsdorf, Morganite и материалом щеточного графита марки ЭГ. Кроме того, у этих материалов в интервале температур от 20 до 1000°C определялось относительное удлинение и термический коэффициент линейного расширения.

Металлоуглеродные вставки зарубежного производства выполнены по условиям создания контактов каркасного типа. Полые пространства каркаса из более термостойкого углерода заполнены более легкоплавкой медью или ее сплавами. Такое структурное построение контакта уменьшает его эрозионное повреждение, что подтверждается его физическими показателями. Если у вставки марки А на коксовой основе с удельным электрическим сопротивлением $30\text{ мОм}\cdot\text{м}$ теплопроводность при 1000°C составляет 25 Вт/м^2 , теплоемкость $1,75\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, относительное удлинение $0,365\%$, термический коэффициент линейного расширения $\alpha 3,8\cdot 10^{-6}\text{ 1/K}$, а у металлографитовых вставок соответственно 32 Вт/м^2 , $1,9\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, $0,45\%$; $\alpha 4,8\cdot 10^{-6}\text{ 1/K}$, то это убедительно подтверждает преимущество последних токосъемных элементов в стойкости к повреждениям электрических разрядов. Это происходит благодаря лучшей теплопроводности и более высокой пластичности матрицы металлоуглеродных вставок, а также из-за того, что при воздействии дуги более теплопроводная фаза композита — медь привлекает и расходует тепловую энергию на плавление, кипение и испарение, сохраняя при этом от повреждения углеродный каркас композита.

По своим физическим характеристикам угольные вставки марки Б, изготовленные из искусственного графита с удельным электросопротивлением $15\text{ мОм}\cdot\text{м}$, превосходят коксовую основу вставок марки А. Это наглядно проявляется в интенсивности повреждения их материалов от воздействия дуги одинаковой мощности (рис. 4, а, б, в).

Если места, пораженные дугой на угольных вставках марок А и Б, повреждены трещинами, то у металлоуглеродных вставок они не образуются. Исследования на растровом микроскопе JEOL JXA-50А показали, что в донной части небольшого кратера меди осталось мало, но зато она в большей степени разместила по краям кратера. В этом месте происходит

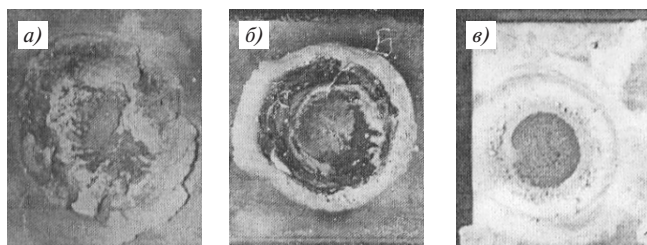


Рис. 4. Повреждение поверхности угольных вставок марок А и Б термическими трещинами у кратера от воздействия дуги одинаковой мощности (а и б соответственно) и отсутствие трещин у кратера металлоуглеродной вставки (в) ($\times 1,5$)

Fig. 4. Damage of surface of the carbon inserts of grades А and В by thermal cracks at the crater due to the arc action of the same power of (а and б, respectively) and the absence of cracks in the crater of metal-carbon insert (в) ($\times 1,5$)

вытеснение, выпотевание меди на поверхность. В ряде случаев из-за вытеснения расплава меди газами образуются сферические полые частицы. На периферии от кратера медь из паров выделяется в виде губчатых образований (рис. 5).

Установленные явления при повреждении различных углеродных материалов электрической дугой позволяют объяснить их устойчивость к электроэрозии или наибольшую их повреждаемость, что было продемонстрировано испытаниями на эрозионную стойкость (рис. 6). Ввод меди в виде порошка в углеродную шихту вставок марки А и Б мало эффективен из-за разобщенности частиц меди в углеродной матрице. В металлоуглеродных вставках зарубежных фирм располагаются взаимосвязанные каналы проводимости из меди или из ее сплавов из-за пропитки углеродной матрицы металлом.

При исследовании пористости, влияющей на теплопроводность контактов, было установлено, что у различных углеродных материалов наблюдается различное статистическое распределение размеров пор. Испытаниями на эрозионную стойкость под воздействием электрических дуг было установлено, что такие углеродные материалы, как ЭГ-141 и ЭГ-75 с мономодальным распределением открытых пор и преобладающим их радиусом от 0,1 до 0,7 мкм, обладают высокой эрозионной стойкостью из-за того, что опорная точка дуги на их поверхности все время перемещается. Материалы марок ЭГ-74, ЭГ-841, Е33 обладают полимодальным распределением пор радиусом от 0,01 до 3,5 мкм и имеют самую низкую эрозионную стойкость (в 6–8 раз), так как кратеры от дуг на их поверхности образуются большие с разрыхленной поверхностью, как у вставок марок А и Б. Углеродные материалы с бимодальным распределением открытых пор по критериям дугостойкости занимают промежуточное положение. Эти исследования позволили подойти к более рациональному выбору углеродного материала для вставок полозов.

Результаты исследований были подтверждены эксплуатационными испытаниями. Зимние испытания в период дугового токосъема зарубежных металлоуглеродных вставок показали, что на 15 электровазонах ЧС2^Т, обращающихся на участке постоянного тока Мурманск — Лоухи, за месяц по предельному износу было заменено 32 полоза с угольными вставками марки Б и 2 из-за разрушения вставок. По предельному износу заменено 7 полозов с металлоуглеродными вставками. Износ вставок марки Б в период жесткого дугового токосъема составил 16,5 мм на 10³ км, а металлоуглеродных вставок — 8 мм на 10³ км пробега токоприемника.

Аналогичные результаты свойств углеродных вставок были получены европейскими исследователями. Если износ угольных и металлоуглеродных вставок

Рис. 5. Выделение меди в виде полых сферических частиц и губчатых образований при конденсации ее паров по краям лунки кратера (×300)

Fig. 5. Extraction of copper in the form of hollow spherical particles and spongy formations at its vapor condensing on the edges of the crater hole (×300)

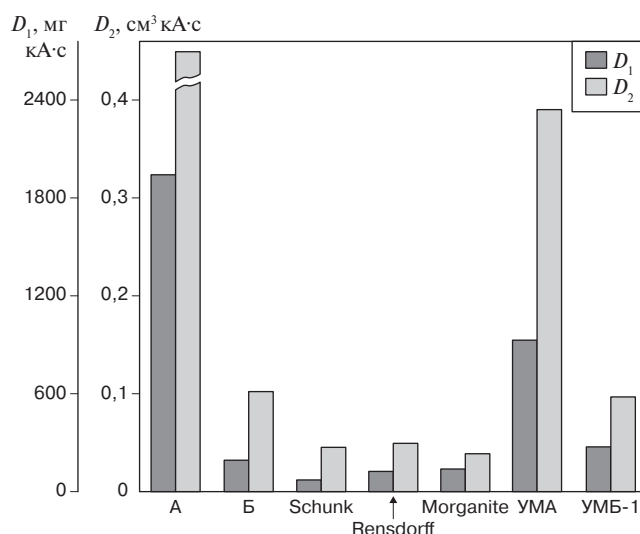
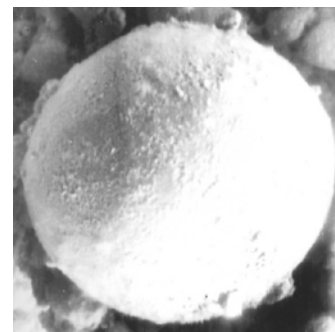


Рис. 6. Электроэрозия токосъемных элементов полозов токоприемников, не содержащих и содержащих в углеродном материале медь:

D_1 — весовая потеря контакта; D_2 — объемная потеря материала; УМА и УМБ-1 — вставки марок А и Б с вводом медного порошка через шихту

Fig. 6. Electroerosion of current collector elements of current collector strips, containing or not containing any copper in carbon material: D_1 — weight loss of contact; D_2 — volume material loss; UMA and UMB-1 — insertion of grades А and В with copper powder entering through the charge

при бездуговом токосъеме одинаков и составляет 1 мм³/км, то при увеличении интенсивности дугообразования на 1,2% износ угольных вставок увеличивается до 4,15, а металлоуглеродных вставок — в меньшей степени, до 2,65 мм³/км. В том случае, когда длительность воздействия дуги возрастает на 1,2%, износ угольных вставок увеличивается до 4,5, а металлоуглеродных — до 2,7 мм³/км [15].

Роль легкоплавкой фазы в построении контактов каркасного вида при создании порошковых контактных пластин на металлической основе. Принципы создания композиционных контактов каркасного типа были подтверждены при создании токосъемных элементов полозов из порошковых материалов на железной основе. При этом в каркасе из железа размещалась более легкоплавкая медная составляющая. Испытаниями на дугостойкость определялся вклад более

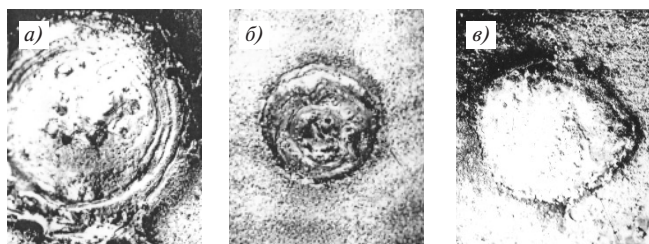


Рис. 7. Участки поверхности порошковых материалов на основе железа с 5% меди (а) и 20% меди (б), а также с 15% меди и 22% сплава Pb—5% Sn, состав марки ВЖЗП (в) при повреждении их электрической дугой одинаковой мощности ($\times 7,5$)

Fig. 7. Surface areas of powder materials on the basis of iron with 5% copper (a) and 20% copper (b), and 15% copper and 22% alloy Pb—5% Sn, the composition of VZH3P mark (c) in case of damage of them by the electric arc of the same power ($\times 7,5$)

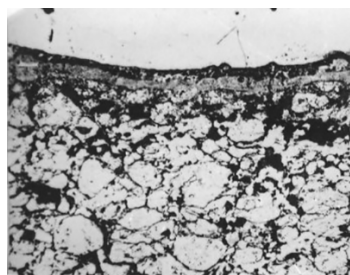


Рис. 8. Микроструктура порошкового материала пластины марки ВЖЗП в донной части кратера при воздействии дуги большой мощности ($\times 200$)

Fig. 8. The microstructure of the powder material of the plate of VZH3P mark in the bottom part of the crater at high power arc exposure ($\times 200$)

легкоплавких фаз в тугоплавкой матрице в уменьшение эрозионных повреждений композита. Проводилось сравнение кратеров после воздействия электрических дуг при силе тока 650 А, напряжении 17 В и размыкании под током 1 с. Наиболее сильно подвержены электроэрозии порошковые композиты с 5% меди, так как в них отсутствует структурно свободная медь из-за полной ее растворимости в железе. Включения меди появляются в железной матрице при ее количестве в композите более 8–10%. На рис. 7, а, б, в видно значительное снижение повреждения контакта при содержании в железе 20% меди.

Так как антифрикционные свойства порошковый композит Fe—Cu приобретает после ввода в него легкоплавкого сплава Pb—5% Sn, то это в большей степени оказывает влияние на снижение эрозионных повреждений. При увеличении в композите количества легкоплавкой составляющей (меди на 15–20%; 16–25% сплава CO5 Pb—5% Sn) эндотермический эффект обеспечивает более интенсивный отвод тепла и снижение электроэрозии. На материале контактных пластин марки ВЖЗП на железной основе с 15% Cu и 22% сплава CO5 разрушение от воздействия дуги небольшое. Ожог представляет собой круглый кратер площадью 3,14 мм² с малой глубиной (см. рис. 7).

В случае воздействия значительных по интенсивности дуг (600 А; время 2 с) донная часть кратера оплавляется с образованием сплавов железа и меди (рис. 8). Вблизи краев кратера образуются капли

выплавившегося свинца из пор железного каркаса композита.

Способность материалов контактов вызывать или снижать появление электрических разрядов. Физические характеристики материалов и их константы (температура плавления, испарения) оказывают влияние на образование электрических разрядов. Они влияют на величину их эрозии в связи со способствующими или затрудняющими условиями образования и поддержания электрического разряда. Рассматривая природу возникновения электрических разрядов, необходимо учитывать, что их образование определяется степенью ионизации воздушных промежутков между контактами, а время их действия при увеличении расстояния между контактами — способностью материалов поддерживать эту ионизацию.

По длительности действия электрических разрядов проводилась оценка способности конкретного материала токосъемного элемента ионизировать воздушный промежуток, насыщать его электронами и ионами при одинаковом токе и напряжении дуги в паре с медным контактным проводом. Было установлено, что ввод в порошковые металлические материалы контактов легкоплавких сплавов позволяет снизить время действия электрического разряда. Это, очевидно, связано с испарением легкоплавкой фазы композита, появлением между контактами ее паров и повышением давления между ними с «выдуванием» — нарушением целостности цепи, проводящей ток через воздушный промежуток. Наибольшая длительность действия электрического разряда проявлялась особенно при токах 15 и 25 А, используемых при эксперименте, у токосъемных элементов матричного типа на медной основе.

Из всех неметаллизированных углеродных токосъемных элементов наибольшую длительность действия электрических разрядов вызывает угольная вставка марки А, имеющая коксовую основу и углеродный материал Ag-1500. У металлоуглеродных вставок наблюдается увеличение времени действия электрических разрядов, а при отсутствии металла в угле, наоборот, уменьшение времени их действия. Из-за значительно более низкой, чем у металлов, теплопроводности углеродной основы токосъемных элементов происходит сильный перегрев ее в опорной точке электрической дуги, что приводит к настолько сильному перегреву паров легкоплавкой фазы, что атомы металла ионизируют и способствуют переносу электрических зарядов через воздушный промежуток.

Эрозия электрических контактов в местах токосъема токов высокой плотности. Проводились исследования интенсивной эрозии материалов контактов в условиях их плотного касания друг с другом. На рис. 9 представлено эрозионное повреждение, наблюдаемое

в эксплуатации, в виде желоба по всей ширине контактной пластины из порошкового материала на железной основе. В результате интенсивного местного нагрева при снятии тока большой плотности происходит оплавление и испарение объемов металла в точках контакта токосъемного элемента с контактным проводом (рис. 9).

С нагревом участков контакта при прохождении тока истинная площадь их взаимодействия увеличивается и переходное электросопротивление R_k уменьшается. Сравнение R_k в различные промежутки времени показало, что достижение высоких температур в контакте и формирование проводящих участков происходят за миллисекунды и завершаются в первом полупериоде переменного тока частотой 50 Гц (10 мс). Поэтому зависимости $R_k = f(I)$ построены (см. рис. 10,

Рис. 9. Прожог в виде желоба по всей ширине контактной порошковой пластины из-за высокой плотности тока ($\times 1,0$)

Fig. 9. Burn-through in the form of gutter over the entire width of the powder contact plate due to high current density ($\times 1,0$)



а, б) для в основном сформировавшегося контакта (за 0,07 с) и сложившегося контакта (за 1,5 с протекания тока). Механизм формирования контакта при прохождении тока через контактный провод на токосъемный элемент косвенно определялся по искажениям синусоид тока I и напряжения U в различные моменты времени. Синусоиды строились процессором

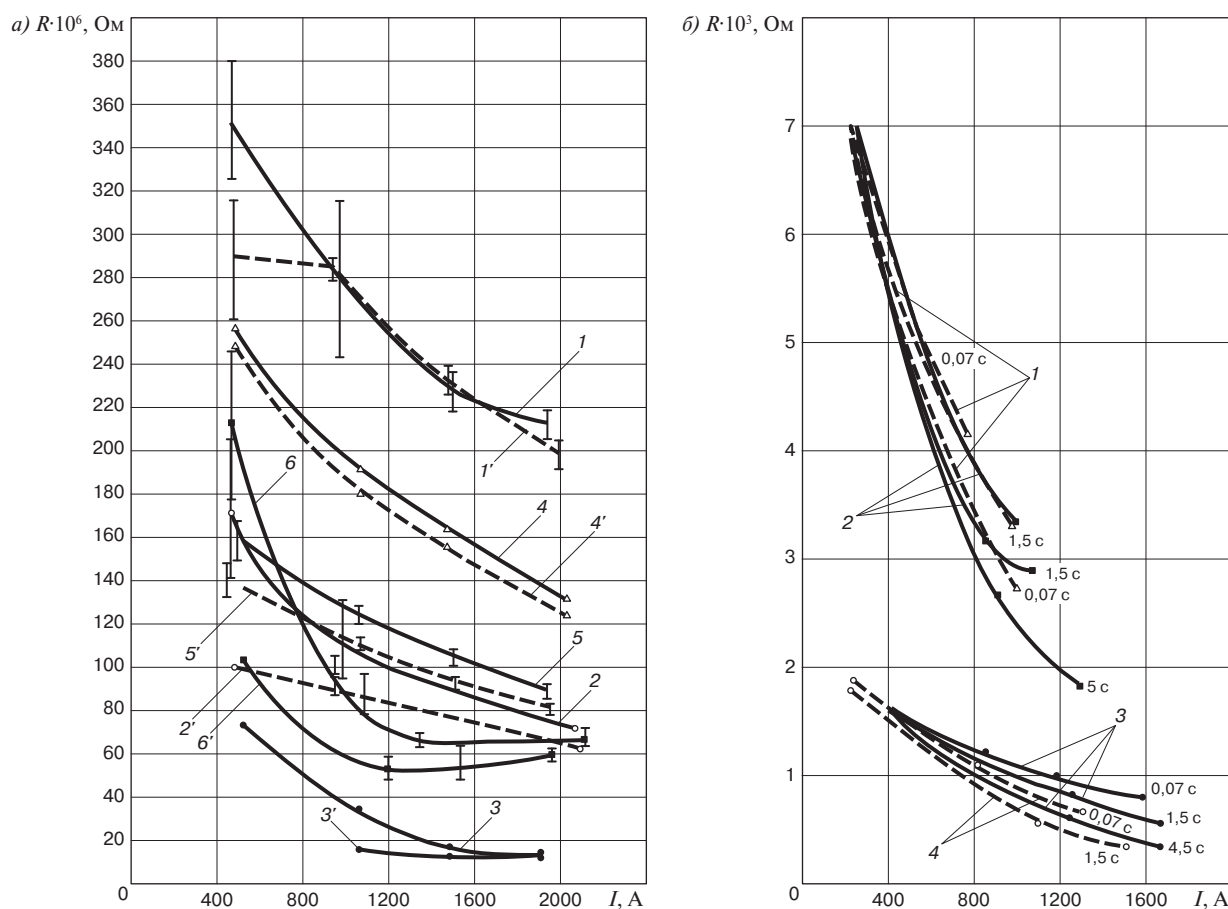


Рис. 10. Изменения переходного сопротивления медного контактного провода МФ-100 с различными токосъемными элементами в зависимости от величины снимаемого тока и времени его протекания:

а) — 1, 2, 3 — порошковые материалы на железной основе с содержанием легкоплавкой фазы 0; 14–18 и более 20,5 соответственно; 4, 5 — порошковые материалы на медной основе с содержанием неметаллической твердой смазки 10–12 и 3%; 6 — монолитная медь; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — в конечный период прохождения тока; б) — при прохождении тока 0,07; 1,5; 4,5; 5 с; 1 — вставка марки А; 2 — вставка марки Б; 3, 4 — вставка металлоуглеродная соответственно фирм Morganite и Ringsdorf

Fig. 10. Changes in transitional resistance of the copper contact wire MF-100 with various current collecting elements depending on the value of collecting current and the period it flows:

а) — 1, 2, 3 — powder materials based on iron containing low-melting phase 0, 14–18 and more 20.5 respectively; 4, 5 — powdered copper-based material containing non-metallic solid lubricant, 10–12 and 3%; 6 — monolithic copper; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — in the final period of current flow; б) — when current flows 0.07, 1.5; 4.5; 5 seconds; 1 — insert of A grade; 2 — insert of B grade; 3, 4 — metallocarbonic insert of Morganite and Ringsdorf respectively

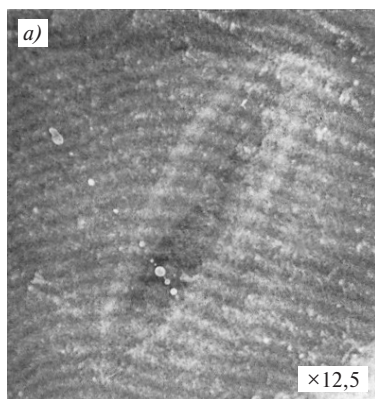
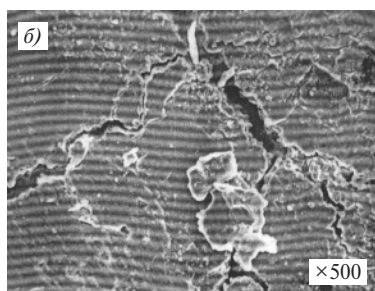


Рис. 11. Поверхность контактной пластины из порошкового материала состава 15% Cu, остальное Fe с повреждениями в месте контакта с проводом при токосъеме 1948 А в течение 4,25 с (а), при токосъеме 8 с появляются термические трещины (б)

Fig. 11. The surface of the contact plate from powder material composition 15% Cu, the rest is Fe with damages in contact point with the wire at current collecting 1948 A for 4.25 s (a), at current collecting for 8 s thermal cracks appear (b)



SF-920 для самого начального момента прохождения тока через контакт и по истечении некоторого времени.

В контактах медный провод — порошковые токосъемные элементы на основе железа с пропиткой легкоплавким сплавом в точках контакта происходит выпотевание легкоплавкой структурной составляющей. По участкам легкоплавкой фазы проходит электрический ток. В первый момент протекания тока происходит изменение мгновенных значений I и U из-за неустановившегося количества легкоплавкой

составляющей в пятнах проводимости в результате ее разбрызгивания и испарения от высокой плотности тока. После снижения плотности тока I благодаря повышению количества легкоплавкой фазы, а следовательно, повышению величины истинного контакта по истечении времени полупериода (10 мс) происходит снижение U и его стабилизация.

Роль легкоплавкой структурной составляющей просматривается и при взаимодействии контактов медь — металлоуглеродный материал вставок. В первый момент на контакте медного провода с металлоуглеродной вставкой образуется пятно проводимости в месте выхода на поверхность при расплавлении металлической фазы из углеродной основы вставки, но из-за высокой плотности тока происходит расплавление, разбрызгивание и испарение металла. В этот момент мгновенные значения I и U претерпевают изменения. Затем осуществляется контакт медь провода — углеродная матрица металлоуглеродной вставки, и U увеличивается. По истечении 20–30 мс при выделении тепловой энергии в контакте в зону его поступает легкоплавкая фаза, и в таких количествах, что обеспечивается металлический контакт со стабилизацией значений I и U ($U = f(t)$, $I = f(t)$ без изменений).

Такой механизм образования пятен контакта проводимости подтверждается одинаковым характером изменения зависимостей $R_k - I$ для контактов металл — металл с легкоплавкой фазой и контактов металл — металлоуглеродный материал (рис. 10, а, б). Величины R_k имеют наибольшие значения для порошковых материалов на железной основе без легкоплавкой фазы, а ввод в этот же материал легкоплавкой структурной составляющей снижает R_k в 4–11 раз.

После взаимодействия медного контактного провода с токосъемными элементами со снятием различных по величине токов оценивалась их повреждаемость. Условия исследований ужесточались увеличением времени прохождения тока через контакты в пределах 0,75–4,5 с. Анализ происходящих на контактных поверхностях токосъемных элементов процессов и состояний их материалов позволил установить для них предельные токи, оценить правильность подхода к их созданию. В результате исследований было установлено, что при снятии токов 1085, 1110, 1538 и 1990 А и времени их прохождения не более 4,5 с на порошковых пластинах состава 15% меди, остальное железо без пропитки легкоплавким сплавом оплавления и термических трещин не наблюдается. При увеличении времени токосъема до 8 с такие повреждения появляются (рис. 11, а, б).

Характер повреждаемости совсем другой у порошкового материала такого же состава, но пропитанного легкоплавким сплавом. В этом случае построение материала контактной пластины полностью отвечает

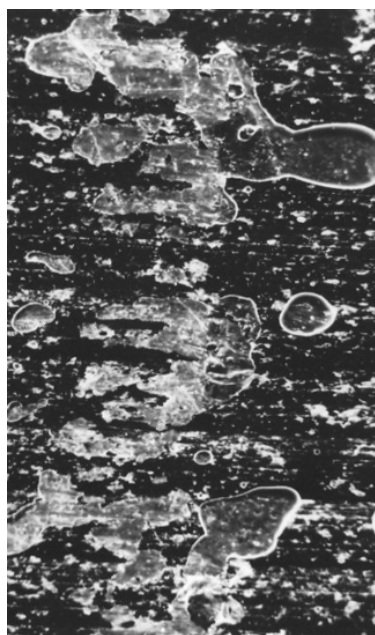


Рис. 12. Поверхность контактной пластины из порошкового материала состава 15% Cu; 22% Pb—5% Sn, остальное Fe без повреждений матрицы, но с выпотеванием легкоплавкого сплава (×20)

Fig. 12. The surface of the contact plate from powder material composition of 15% Cu; 22% Pb—5% Sn, remainder Fe without matrix damage, but with exudation of fusible alloy (×20)

принципам построения контактов каркасного типа. На контактной поверхности нет оплавлений матричного материала, нет и термических трещин, но наблюдается выпотевание легкоплавкого сплава при токосъеме тока 1973 А в течение 8 с (рис. 12).

У металлоуглеродных вставок, построенных по принципу контактов матричного типа, при токах выше 1700 А и времени их прохождения от 0,7 до 3 с на поверхности контакта с проводом появляются капли меди и истинная площадь контактирования увеличивается. Термические трещины на металлоуглеродных вставках отсутствуют даже при более высоких токах и большем времени токосъема. На угольных вставках марки А термические трещины были обнаружены при токе 870 А и времени токосъема 4 с.

Эрозия контактного провода при дуговом токосъеме. Что касается контактного провода, то его эрозийные повреждения при воздействии дуговых разрядов сводятся к расплавлению меди на контактной поверхности с образованием литой столбчатой структуры, пораженной большим количеством газовых раковин. От поверхности за литой зоной располагается зона металла, прошедшего процесс рекристаллизации обработки от тепловой энергии, выделившейся при расплавлении меди (рис. 13). Такой вид повреждения снижает прочность контактного провода и его износостойкость.

При использовании для токосъема угольных вставок на электровагонах постоянного тока износ контактного провода увеличивается из-за электроэрозийных процессов и составляет от 0,3 до 0,9 мм² на 10⁴ проходов токоприемников, в то время как на переменном токе при малых его величинах износ провода на тот же измеритель составляет 0,133 мм².

Выводы. 1. Построение контактов каркасного типа с углеродной матрицей сводится к вводу в нее легкоплавкой фазы в виде меди или ее сплавов по технологии пропитки.

2. Построение контактов каркасного типа на металлической основе осуществляется вводом в каркас из более тугоплавкого металла легкоплавкого металла через шихту порошкового композита или по технологии пропитки уже спеченного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсеевич О.И., Некрашевич И.Г. О селективности в явлении эмиссии вещества из твердых бинарных сплавов при импульсных разрядах в воздухе // Электрические контакты: сб. М.: Энергия, 1964. С. 36–41.
2. Афанасьев М.В., Головейко А.Г. Влияние процентного содержания компонентов на электрическую эрозию бинарных сплавов // Электрические контакты: сб. М.: Энергия, 1964. С. 193–196.
3. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Влияние легколетучих составляющих в контактном материале на электрическую эрозию кон-

Рис. 13. Микроструктура у контактной поверхности контактного провода после дугового токосъема (×500)

Fig. 13. The microstructure in contact surface of the contact wires after the arc current collection (×500)



тактов в вакууме // Электротехническая промышленность: сб. М.: Госэнергоиздат, 1978. Т. 1. С. 42–88.

4. Золотых Б.Н. О природе передачи энергии электродам в импульсном разряде при малых промежутках // Электрические контакты. Труды совещания: сб. М.: Энергия, 1964. С. 42–88.

5. Усов В.В., Займовский А.С. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. М.: Госэнергоиздат, 1957. 184 с.

6. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. М.: Металлургия, 1973. 325 с.

7. Берент В.Я., Гнездилов С.А., Шалунов Е.П. Обеспечение надежного токосъема с повышением веса поездов и скорости их движения на электрифицированных железных дорогах // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 6. С. 49–53.

8. Альтман А.Б., Быстрова Э.С. К вопросу о структуре износостойчивых электрических контактов // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 214–223.

9. Францевич И.Н. Материалы электрических контактов // Лекции Всесоюзной школы по электрическим контактам и электродам: сб. Ч. 1 / АН УССР ИПМ. Киев, 1969. С. 120–124.

10. Теодорович О.К., Дьяченко М.Е., Кацапуха С.А. Композиционные электроконтактные материалы и экономическая эффективность их применения. Киев: Укр. НИИНТИ, 1973. 135 с.

11. Альтман А.Б., Мелашенко И.П., Быстрова И.С. Современные электрокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1956. С. 171–185.

12. Мелашенко И.П. Материалы для электрических коммутирующих контактов. — В кн.: Справочник по электротехническим материалам. М.: Т.З.Л. Энергия, 1976. С. 473–499.

13. Францевич И.Н., Теодорович О.К. Металлокерамические контакты // Электрические контакты: сб. М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 186–199.

14. Белкин Г.С., Данилов И.М. Исследование особенности электрической эрозии металлокерамических материалов // Электричество. 1972. № 8. С. 63–66.

15. Износ материала контактных вставок токоприемников // Железные дороги мира. 2013. № 10. С. 50–56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕРЕНТ Валентин Янович,
д-р техн. наук, научный консультант, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.07.2015 г., актуализирована 23.09.2015 г., принята к публикации 15.10.2015 г.

Electroerosion of electric contacts

V. Ya. BERENT

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Contact wire of electrified railways and current collecting elements of strips of current collectors are working under atmospheric conditions, often causing failure of its interaction. Electrical discharges occur as a result of failure of the direct interaction between the contacts. Erosion of electric contacts occurs as a result of such discharges. Matrix type contacts, recommendations on its composition as well as nature of its damageability were considered. Destructures of carbon materials by arc discharge were investigated. Higher erosion resistance to metal-carbon inserts is shown. Positive role of low-melting phase in composition of frame-type contacts under the influence of an electric arc are confirmed. The erosion damages to the contacts during current collecting of high-density currents were considered. It is concluded that the construction of the contacts of frame type with a carbon matrix comes down to putting into it low-melting phase in the form of copper or its alloys by impregnation technology. Creation of contacts of frame type on a metal basis is carried out by input fusible metal into a framework of more high-melting metal through a charge of a powder composite or by technology of impregnation of already sintered material.

Keywords: electric erosion; electric arc; contacts of matrix type; arc of matrix type; contacts of frame type; coal inserts; metal-carbon inserts; powder contact plates; high-melting component of contact composite

REFERENCES

1. Avseevich O.I., Nekrashevich I.G. *O selektivnosti v yavlenii emissii veshchestva iz tverdykh binarnykh spлавov pri impul'snykh razryadakh v vozdukh* [On the selectivity in the phenomenon of emission of substance from a solid binary alloys in pulsed discharges in air. Electric contacts. Collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 36–41.
2. Afanas'ev M. V., Goloveyko A.G. *Vliyaniye protsentnogo soderzhaniya komponentov na elektricheskuyu eroziyu binarnykh spлавov* [The impact of the percentage of components on electric erosion of binary alloys. Electric contacts. Collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 193–196.
3. Belkin G.S., Kiselev V. Ya. *Vliyaniye legkoletuchikh sostavlyayushchikh v kontaktnom materiale na elektricheskuyu eroziyu kontaktov v vakuum* [Impact of volatile components in the contact material on electric contact erosion in vacuum], *Elektrotehnicheskaya promyshlennost'*. Electrical industry. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1978, vol. 1, pp. 42–88.
4. Zolotikh B.N. *O prirode peredachi energii elektrodam v impul'snom razryade pri malyykh promezhutkakh* [On the nature of energy transfer of the electrodes in a pulsed discharge at small intervals. Electric contacts. Meeting proceedings collection]. Moscow, Energia Publ., 1964, pp. 42–88.
5. Usov V.V., Zaymovskiy A.S. *Provodnikovyye, reostatnye i kontaktные материалы* [Conductor, rheostat and contact materials]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1957, 184 p.
6. Rosenberg V.M. *Osnovy zharoprochnosti metallicheskiykh materialov* [Fundamentals of heat resistance of metal materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 325 p.
7. Berent V. Ya., Gnezdilov S.A., Shalunov E.P. *Obespecheniye nadezhnogo tokos'ema s povysheniem vesa poezdov i skorosti ikh dvizheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh* [Providing a reliable current collection with an increase in weight of trains and their speed on electrified railways]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2011, no. 6, pp. 49–53.
8. Altman A.B., Bystrova E.S. *K voprosu o strukture iznosous-toychivyykh elektricheskikh kontaktov* [On the structure of wear-resistant electrical contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 214–223.
9. Frantsevich I.N. *Materialy elektricheskikh kontaktov* [Materials for electric contacts. Lectures of All-Union school on electrical contacts and electrodes. Collection. Part 1]. Kyiv, AN USSR IPM Publ., 1969, pp. 120–124.
10. Teodorovich O.K., D'yachenko M. E., Katsapukha S.A. *Kompozitsionnye elektrokontaktnye материалы i ekonomicheskaya effektivnost' ikh primeneniya* [Compositional electric contact materials and cost-effectiveness of their application]. Kyiv, Ukrainian NIINTI Publ., 1973, 135 p.
11. Altman A.B., Melashenko I.P., Bystrova I.S. *Sovremennyye elektrokeramicheskie kontakty* [Modern electric ceramic contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956, pp. 171–185.
12. Malashenko I.P. *Materialy dlya elektricheskikh kommutiruyushchikh kontaktov* [Materials for electrical switching contacts. Reference book on electric engineering materials]. Moscow, Energia Publ., 1976, pp. 743–499.
13. Frantsevich I.N., Teodorovich O.K. *Metallokeramicheskie kontakty* [Metal ceramic contacts. Electric contacts. Collection]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958, pp. 186–199.
14. Belkin G.S., Danilov I.M. *Issledovaniye osobennosti elektricheskoy erozii metallokeramicheskikh materialov* [Study on features of electric erosion of cermet materials]. *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 63–66.
15. *Iznos materiala kontaktnykh vstavok tokopriemnikov* [Material wear of contact inserts of current collectors]. *Zheleznnye dorogi mira*, 2013, no. 10, pp. 50–56.

ABOUT THE AUTHOR

BERENT Valentin Yanovich,

Dr. Sci. (Eng.), scientific consultant of JSC "VNIIZhT"

Received 28.07.2015

Revised 23.09.2015

Accepted 15.10.2015

■ E-mail: val.berent@yandex.ru (V. Ya. Berent)