

УДК 621.787

**Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Г. Ф. Ловшенко, канд. техн. наук, доц.,  
А. И. Хабибуллин**

## **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ТОКОПОДВОДЯЩИХ НАКОНЕЧНИКОВ И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Проведен анализ условий работы токоподводящих наконечников для сварки проволокой в среде углекислого газа, рассмотрен процесс изнашивания контакта – «токоподводящий наконечник – электродная проволока» и факторы, оказывающие влияние на разрушение контактных поверхностей; приведен перечень основных характеристик и физико-химических свойств, которыми должен обладать материал для скользящих контактов, и их желаемый качественный уровень. Указаны перспективные направления повышения эксплуатационных свойств наконечников, предложен композиционный порошковый материал на основе меди, обладающий повышенной стойкостью.

Эксплуатационные свойства горелок для дуговой сварки плавящимся электродом в большей мере определяются качеством токоподводящего наконечника (ТПН) и, прежде всего, его стойкостью. При прохождении электродной проволоки наконечники быстро изнашиваются, в результате чего нарушается электрический контакт и ухудшается стабильность процесса сварки. Наиболее широкое применение получили наконечники из меди без поджимного контакта, изготавливаемые точением или штамповкой. Срок службы их составляет от 4 до 9 ч непрерывной работы [1].

Известно, что при работе сварочного аппарата на предварительно отрегулированных оптимальных режимах наблюдаются нарушения стабильности процесса. Исследования поверхностей каналов ТПН [2] дали возможность установить, что причинами нарушения устойчивости процесса сварки являются изменения условий контактирования электродной проволоки с токоподводящим наконечником. Измерения падения напряжения на контакте «электрод – токоподвод» показали, что при сварке оно обычно составляет 2–4 В, но в некоторые моменты оно достигает 10–15 В. Кроме того, было отмечено, что контактное падение напряжения возрастает до недопустимых значений и по мере износа ТПН. Такие большие падения напряжения являются следствием

активного электроэрозионного процесса в контакте.

В [2] исследовали процесс изнашивания контакта «ТПН – электродная проволока» в условиях работы без токовой нагрузки и при сварке. При сварке износ токоподводящего наконечника существенно выше, чем при скольжении без тока. Увеличение износа наконечника при прохождении тока связано со снижением твердости материала трущихся поверхностей на участках контактных пятен под воздействием джоулева тепла.

В процессе действия только механического износа у поверхности канала происходит изменение микроструктуры на глубину до 0,15 мм. При этом материал на поверхности канала деформированный, мелкозернистый. Зерна вытянуты вдоль канала в виде волокон. По мере удаления от поверхности величина зерен увеличивается и принимает обычную равноосную форму, микротвердость изменяется от 1400–1800 до 900–1270 МПа.

Во всех токоподводящих наконечниках явно выражена неравномерность износа канала в направлении выхода электродной проволоки – диаметр канала увеличивается. Как показывает анализ данных о распределении тока в контактной паре, токоподводящая поверхность наконечника загружена неравномерно. Участок переноса основной доли тока

(более 50 %) имеет малую протяженность – около 30 % его длины. Плотность тока на этом участке достигает 200–350 А/мм<sup>2</sup>. Пропорционально распределению плотности тока происходит и износ наконечника.

Проведенные металлографические исследования сильно изношенных ТПН [2] показали, что на разрушенной контактной поверхности со стороны выхода электрода из наконечника наблюдаются следы механического и эрозионного износа, а со стороны входа электродной проволоки в наконечник – только механического износа.

Таким образом, можно сделать вывод, что износ поверхности канала токоподводящего наконечника в процессе сварки является следствием комплексного воздействия: механического трения проволоки о поверхность канала, электрических разрядов и нагрева в результате выделения джоулева тепла при прохождении тока.

Так как контакт электродной проволоки и канала ТПН реализуется, главным образом, по зонам гребней шероховатости поверхности, то сильный разогрев материала в указанной зоне интенсифицирует процесс изнашивания. Канал на выходе приобретает овальную форму в поперечном сечении [1]. Вследствие износа цилиндрический канал ТПН приобретает в поперечном сечении овальную форму, а в продольном – конусообразную. Эти изменения формы канала приводят к следующим негативным явлениям: уменьшению площади контактирующих поверхностей и увеличению контактного сопротивления; недопустимому возрастанию контактного падения напряжения; усилению электроэрозионного процесса; отклонению электродной проволоки от оси свариваемого шва; неконтролируемому увеличению вылета электрода. Перечисленные явления нарушают стабильность процесса сварки и вызывают образование дефектов в швах.

В свою очередь, активизация электроэрозионного процесса вызывает интенсивный нагрев ТПН. Повышение температуры неизбежно приводит к интенсификации следующих процессов: абразивного

износа из-за снижения твердости; налипания брызг на поверхность ТПН; адгезии, вызывающей «прихватывание» электродной проволоки к каналу ТПН. В итоге на стадии катастрофического износа канала происходит сварка проволоки и наконечника вследствие возникновения дугового разряда.

**Целью настоящей работы являлись:** анализ условий работы токоподводящих наконечников, определение перспективных направлений повышения их эксплуатационных свойств, создание композиционного материала, обладающего повышенной стойкостью.

Надежность и долговечность ТПН в значительной мере зависит от природы структурных и фазовых превращений в поверхностных слоях контактных материалов при трении.

В процессе работы материалы должны обеспечить высокую износостойкость и электрическую проводимость скользящего контакта. Выполнение этих противоречивых требований представляет сложную задачу.

В соответствии с классификацией видов износа все процессы при трении можно разделить на нормальные (изнашивание) и недопустимые (повреждаемость).

К нормальным относятся механохимические процессы, связанные с образованием на поверхностях трения пленок вторичных структур. В этом случае процесс изнашивания локализуется в тончайших поверхностных слоях и характеризуется динамическим равновесием образования и разрушения вторичных структур. К недопустимым явлениям относятся: схватывание I рода (атермическое) и II рода (термическое), фреттинг-процесс и абразивное изнашивание [3].

Разрушение происходит наиболее интенсивно при механической форме абразивной повреждаемости материалов. Высокой интенсивностью поверхностного разрушения характеризуются и другие виды повреждаемости. Мини-

мальная интенсивность наблюдается при нормальном механохимическом изнашивании.

Если показать удельную работу износа материалов при трении как отношение работы сил трения к интенсивности

поверхностного разрушения, то различие между нормальными и недопустимыми процессами станет более четким. Результаты исследований [3] приведены в табл. 1.

Табл. 1. Удельная работа износа в зависимости от его вида

Вид износа	Удельная работа износа, кг·м/мм <sup>3</sup>
Абразивный износ	1–10
Схватывание I рода	10–100
Схватывание II рода	100–1 000
Фреттинг-процесс	1 000–10 000
Механохимическая форма абразивного износа	10 000–100 000
Нормальный механохимический износ	100 000–1 000 000

Удельная работа износа ТПН, изготовленных из меди и различных бронз, составляет 15000–80000 кг·м/мм<sup>3</sup>, что соответствует механохимической форме абразивного износа. Исследование нормальных процессов изнашивания при трении с привлечением методов структурного анализа позволило установить [3], что в основе их лежит универсальное явление структурной приспособляемости материалов при трении.

Это явление обусловлено перестройкой исходной структуры поверхностных слоев в метастабильную форму, термодинамически более выгодную для данных условий изнашивания. Для всех материалов существует определенный диапазон изменения параметров нагружения, в котором реализуется структурная приспособляемость. В этом диапазоне существует феномен минимизации всех видов взаимодействия твердых тел и среды при трении (механических, физико-химических, термических, электромагнитных, акустических и др.). Все основные взаимодействия локализуются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах. Работа трения при этом, в основном, преобразуется в теплоту, которая рассеивается, а энергия, затрачиваемая на разрушение

единицы объема, становится максимальной, что приводит к резкому повышению сопротивления материала поверхностному разрушению.

Вторичные структуры являются результатом пластической деформации, структурно-термической активации и взаимодействия материала со средой. В [4] отмечены особенности пластической деформации при трении в скользящих контактах: локализация в тонких поверхностных слоях (порядка 10<sup>-4</sup> см); измельчение и ориентация структуры вдоль направления перемещения; исключительно высокая плотность энергии, запасенной в поверхностном слое. Структурная и термическая активация поверхностного слоя вызывает интенсификацию физико-химических процессов взаимодействия деформируемого слоя со средой и контртелом (адсорбции, диффузии, химических реакций). Совокупность указанных процессов вызывает пассивацию поверхностного слоя и образование метастабильных структур, названных вторичными.

Вторичные структуры бывают двух типов. Вторичные структуры первого типа представляют собой пересыщенные

твердые растворы активного элемента среды (кислорода, азота, фосфора, серы и других электроотрицательных элементов) в металле (рис. 1, а). Вторичные структуры второго типа – это метастабильные химические соединения металлов с элементами среды нестехиометрического состава (рис. 1, б).

Характерным для двух типов вторичных структур являются их поверхностная локализация, ультрадисперсное строение, способность минимизировать физико-химические процессы (коррозию,

диффузию, адгезию) и разрушение нижележащих слоев.

Отличие структур заключается в следующем: первый тип электропроводен, сверхпластичен (легко перетекает по поверхности трения), имеет слабо выраженный субрельеф, пониженные адсорбционные и адгезионные характеристики; второй тип имеет пониженную электропроводность и пластичность, высокую прочность, ярко выраженный субрельеф, хорошо удерживает жидкие и твердые смазки.

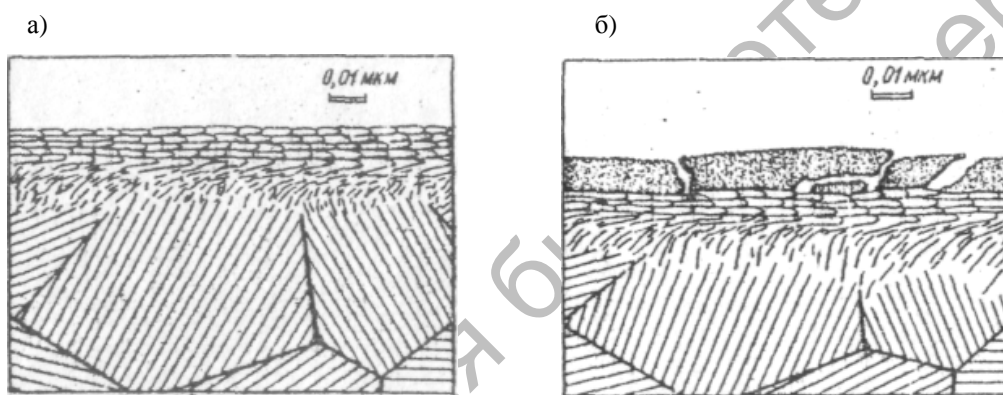


Рис. 1. Схема строения поверхностных слоев при нормальном трении: а – первый, б – второй тип вторичных структур

Первый тип структуры существует при относительно низких значениях работы трения, когда преобладает структурная активация. В определенном диапазоне значений работы трения могут сосуществовать два типа. Второй тип преобладает при преимущественно термической активации.

Наилучшие условия для работы электрических контактов создаются, когда две поверхности трения покрыты пленками вторичных структур первого типа. В этом случае обеспечиваются как высокая электропроводность контакта, так и его повышенная износостойкость.

Обеспечить заданное сочетание вторичных структур на контактных поверхностях можно различными путями. Прежде всего, это может быть достигнуто специальным легированием электро-

контактных материалов элементами, расширяющими область существования вторичных структур первого типа. В этом отношении наиболее широкие возможности открывают методы порошковой металлургии, позволяющие получать материалы с уникальным сочетанием физических и механических свойств.

Другим важным путем является оптимизация условий среды. Это может быть достигнуто, например, заменой воздушной среды менее активной. Если контакты работают со смазкой, расширить диапазон существования вторичных структур первого типа можно введением специальных присадок – антиокислителей.

Таким образом, для обеспечения

надежной и долговечной работы скользящих контактов важны не только высокие механические свойства и электропроводность, малая склонность к схватыванию материалов, но и структурные условия – оптимальное сочетание типов вторичных структур на контактных поверхностях [3].

В процессе работы на ТПН действуют три группы факторов, оказывающих влияние на разрушение контактных поверхностей, что в конечном итоге приводит к нарушениям работы сварочного аппарата в целом: 1) электрические факторы: электрический ток, напряжение, вид тока, мощность источника тока; нагрузка цепи (омическая, емкостная или индуктивная); 2) механические и конструкционные факторы: контактное давление, межконтактные зазоры, скорость перемещения контактов, геометрические размеры и механические свойства контактов, вид покрытия электродной проволоки, состояние ее поверхности и шероховатость; 3) физико-химические факторы: состав, давление, температура окружающей среды.

Согласно данным ранговой корреляции факторов, определяющих работоспособность скользящих электроконтактов [5], фактором, оказывающим решающее влияние, является контактное нажатие. К факторам, существенно влияющим на износостойкость, относят твердость материала контакта, соотношение твердостей материалов пары, горячую твердость, скорость скольжения и шероховатость контртела.

В процессе сварки в результате воздействия указанных выше факторов могут возникать следующие явления: прилипание брызг к поверхности ТПН; сваривание ТПН с электродной проволокой; износ рабочей поверхности канала.

Прилипание брызг к поверхности наконечника может привести сварочный аппарат к отказам или к нарушению стабильности процесса сварки.

Отказы вызывают появление в сварном шве недопустимых дефектов, увеличение времени простоев по обслужива-

нию и повышенный расход ТПН.

Явление прилипания брызг наиболее характерно при сварке длинной дугой в среде углекислого газа. В этом случае происходит выбрасывание брызг металла из сварочной ванны, вызываемое выделением из нее газов, образующихся в результате протекания металлургических процессов. Прилипание брызг приводит к образованию «мостика» между ТПН и соплом горелки и, вследствие этого, возникновению короткого замыкания сопла и заготовки.

С другой стороны, прилипание стальных капель к торцу ТПН вызывает появление электрических разрядов между ним и электродной проволокой. Со временем, по мере развития этого процесса, происходит образование дугового разряда и сплавление электродной проволоки со стальными брызгами на поверхности ТПН.

В случае возникновения электрического разряда количество энергии, выделяющейся на рабочих поверхностях контактов, зависит от параметров электрической цепи: силы тока, напряжения и мощности источника тока. Указанные факторы определяют форму и длительность электрического разряда. Если параметры электрической цепи обеспечивают возможность возникновения и горения электрической дуги, то в зоне ее непосредственного воздействия на рабочую поверхность контактов под опорным пятном развиваются чрезвычайно высокая температура (15 000–20 000 °С) и давление до 1,0 кПа. Кратковременно действующий источник тепла расплавляет и испаряет небольшой объем материала. Этот объем ограничен вследствие погасания дуги или ее перемещения по поверхности контакта. Специфические явления, сопровождающие электрическую дугу (термические напряжения, термоупругая волна, электродинамические усилия, взрывообразные выделения адсорбированных на поверхности контактов и растворенных в металле газов, давление

в столбе дуги), приводят к интенсивному испарению и разбрызгиванию расплавленного материала, механическому отторжению и выбросу отдельных частиц не расплавленного, деформированного и охрупченного металла [6, 7]. В результате сдвиговых усилий, направленных радиально от центра кратера к периферии, размягченный металл перемещается и образует валик кратера. Поверхность контакта вокруг кратера покрывается застывшими и закристаллизовавшимися брызгами, каплями конденсата металлических паров и отторгнутых твердых частиц [8]. В результате перемещения дуги на поверхности контактов появляются новые кратеры или их комплексы, трещины и отколы как следствие усталостных явлений, связанных с термическими и другими напряжениями на поверхности контактов [9, 10]. В общем случае эрозионное разрушение рабочих поверхностей контактов является следствием термического действия электрической дуги, в результате которого материал контакта под опорным пятном дуги расплавляется, разбрызгивается, испаряется и окисляется. Поэтому электроэрозионной стойкостью обладают материалы, отличающиеся высокими теплофизическими характеристиками: температурой плавления и кипения, скрытой теплотой плавления и сублимации, теплоемкостью, теплопроводностью и низкой упругостью паров в широком интервале температур. Все эти свойства определяют количество переносимого в дуге материала, потери вещества при испарении и разбрызгивании, вызываемом взрывоподобным выделением газов, находящихся в материале контактов, или воздействием термоупругой волны. Очень важно, чтобы материал контактов обладал достаточной термостойкостью, пластичностью и прочностью, особенно при повышенных температурах. Чем лучше эти свойства, тем меньше разрушается поверхность контакта в результате растрескивания и отторжения частиц ее в твердом состоянии под воздействием термоударов.

В газовой среде дуга гасится деиони-

зацией с восстановлением диэлектрической прочности межконтактного зазора. Процесс же восстановления диэлектрической прочности тоже зависит от свойств материала контактов, так как главным регулятором восстановления диэлектрической прочности является температура поверхности контактов, от которой зависит величина термоэлектрической эмиссии. Отвод тепла от нагретой зоны поверхности определяется теплопроводностью материала контакта, а его эмиссионная способность в данном случае играет второстепенную роль.

Эрозия медных материалов сопровождается процессами окисления и газопоглощения. Как известно, медь растворяет кислород (при 1050 °С до 0,0156 %) и образует два оксида, стабильных в разных температурных интервалах. Изменение растворимости газа при затвердевании меди вызывает появление на ее поверхности пузырей и раковин. При увеличении температуры поверхности выше 1200 °С на ней образуется шлаковая пленка из оксида  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Она, являясь диэлектриком, приводит к обрыву дуги [11].

Сваривание ТПН с проволокой может происходить не только в случае увеличения зазора в скользящем контакте. Физико-химические процессы, протекающие на рабочих поверхностях ТПН в процессе скольжения электродной проволоки и прохождения электрического тока, могут вызвать необратимые изменения материала как на этих поверхностях, так и в прилегающих к ним объемах. Характер изменений, величина охваченной ими площади и глубина их распространения определяются количеством энергии, выделяющейся на этих поверхностях и свойствами применяемых материалов [9, 12, 13]. Количество энергии в виде джоулевого тепла, выделяющегося в объеме ТПН и на их рабочих поверхностях, зависит от величины тока, удельного сопротивления материала контактов, величины их переходного сопротивления и времени прохождения тока. Под действием этого

тепла могут происходить рекристаллизация и разупрочнение материала выступов на контактных поверхностях, а также их пластическая деформация вследствие контактного нажатия. Разогрев материала ТПН в отдельных точках поверхности способствует не только сглаживанию неровностей, но и их «прихватыванию» к электродной проволоке. Это явление характерно для материалов с низкими значениями горячей твердости.

Выбор материала для ТПН затруднен тем, что необходимо реализовать многообразный и противоречивый комплекс свойств, диктуемых условиями их работы. Требованиям, предъявляемым к этим материалам, частично удовлетворяют вольфрам, молибден, рений, тантал и графит. Они имеют наиболее высокие значения теплофизических свойств и критической силы тока и напряжения дугообразования, весьма высокую работу выхода электронов и потенциал ионизации. Однако эти материалы обладают существенными недостатками: коррозионная стойкость их невелика, они недостаточно электро- и теплопроводны, отличаются невысокой термостойкостью и пластичностью. Под действием механических и термических усилий контакты из этих металлов склонны к усталостному разрушению. Серебро, медь, золото, платина, палладий обладают высокими электро- и теплопроводностью, пластичностью и коррозионной стойкостью (кроме меди), однако их теплофизические свойства незначительны, и они не отличаются хорошей электроэрозионной стойкостью. Используя методы порошковой металлургии, можно получить такой композиционный материал, который будет обладать совокупностью свойств, несовместимых в одном материале.

Композиционные материалы можно определить как гетерогенную систему, представленную компонентами, не растворяющимися друг в друге в твердом состоянии. К этим материалам могут быть отнесены неравновесные системы, фазовые составляющие которых не взаимо-

действуют или слабо взаимодействуют друг с другом в широком интервале температур, сохраняя свои индивидуальные свойства. Такой композиционный материал может иметь требуемый набор характеристик вследствие аддитивности свойств отдельных фазовых составляющих.

Чрезвычайно важным преимуществом порошковой технологии является возможность создания композиционных материалов, в которых сосуществуют структурные составляющие, выполняющие строго определенные функции. Сочетание различных специфических ультрадисперсных фаз в определенных количественных соотношениях и с определенным характером их распределения позволяет реализовать в подобных материалах новые свойства, недостижимые в материалах, получаемых традиционными металлургическими способами. С учетом таких широких возможностей открываются перспективы создания принципиально новых материалов электротехнического назначения с существенно более высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

В исследованиях [14] было отмечено, что введение даже небольшого количества оксидов в композиционные материалы для электроконтактов приводит к существенному ухудшению условий смачивания. Этот эффект желательно использовать в ТПН для борьбы с прилипанием брызг и сплавлением с электродной проволокой.

В [15] исследовалось влияние введения оксидов различных металлов на эрозионную стойкость композиционных электроконтактных материалов. Было отмечено, что при введении дисперсных оксидных фаз, не взаимодействующих с матрицей, в процессе работы контакта сохраняется ее гетерогенное строение несмотря на то, что флуктуации температур на рабочих поверхностях превышают температуру плавления матрицы. Таким образом, наличие в материале

контактов небольшого количества дисперсных оксидных включений позволяет значительно снизить перенос материала благодаря измельчению зерна и торможению диффузионных процессов на рабочих поверхностях. При этом значительно возрастают механические свойства, что положительно влияет на стойкость контакта и в процессе абразивного изнашивания. Деформационное формирование анизотропной гетерофазной структуры у такого материала придает ему еще большую электроэрозионную стойкость.

В [16] рассматривалось влияние дисперсных включений с низкой работой выхода электрона на электроэрозионные характеристики порошковой меди. В ней было отмечено, что на этих включениях происходит локализация разрядных пятен и, таким образом, они, принимая на себя основной энергетический удар, снижают эрозию медной основы. Эффект снижения электроэрозии растет по мере увеличения содержания этих дисперсных включений. Однако при превышении их количества более 3 % по массе, из-за образования контактов между ними, уменьшается контактная поверхность частиц медной основы. Это приводит к снижению ее прочности, электропроводности и увеличивает эрозионный износ. Таким образом, между эмиссионными свойствами поверхности композиционного материала и его электроэрозионными характеристиками существует зависимость, учитывая которую можно выбирать дисперсные включения, повышающие сопротивление эрозии медной основы, а также определять оптимальное количество необходимых компонентов.

В [8] приведен перечень основных характеристик и физико-химических свойств, которыми должен обладать материал для скользящих контактов, и их желаемый качественный уровень.

Для достижения высокой износостойкости против механических воздействий материал должен иметь высокие значения: твердости, прочности, пластичности, ударной вязкости, усталостной

прочности; горячей твердости и прочности; обладать мелкозернистой структурой и способностью к образованию на поверхностях трения пленок вторичных структур.

Для высокой электроэрозионной стойкости, в дополнение к перечисленным свойствам, материал должен отличаться повышенными значениями: температур плавления, кипения и размягчения; теплоты плавления и сублимации; теплоемкости, теплопроводности; жаропрочности, термостойкости; поверхностного натяжения на границе фаз «твердая – жидкая», «жидкая – газ»; работы выхода электронов, потенциала ионизации; критической силы тока и напряжения дугообразования; коррозионной стойкости; летучести продуктов коррозии, сопротивления разрыву и сжатию; напряжения размягчения.

Для низкой склонности к динамическому и статическому свариванию материалы должны иметь мелкозернистую структуру с равномерным распределением дисперсных оксидных фаз и обладать высокими значениями: температур размягчения и плавления; теплопроводности и электропроводности; горячей твердости и предела упругости; поверхностного натяжения на границе фаз «жидкость – жидкость», «жидкость – твердая»; прочности и пластичности коррозионных пленок; работы выхода электронов и критической силы тока и напряжения дугообразования.

Дисперсно-упрочненная медь, теория и технология производства которой разработаны и освоены в Белорусско-Российском университете [17], представляет собой композицию, состоящую из медной матрицы, в которой равномерно распределено до 5 % по объему дисперсных частиц упрочняющей фазы. В качестве последней применяются термодинамически стабильные соединения с высоким значением модуля сдвига, например  $Al_2O_3$ .

Структура характеризуется следующими параметрами: размер зерен



основы  $\leq 0,5$  мкм, размер блоков  $\leq 50$  нм. Основа представляет собой низкоконцентрированный твердый раствор алюминия в меди с содержанием легирующего элемента  $\leq 0,1$  %. Высокорастворимая поверхность границ зерен и субзерен стабилизирована наноразмерными (менее 20 нм) включениями фазы  $Al_2O_3$ .

Указанная структура обеспечивает низкую скорость протекания рекристаллизационных процессов, высокие значения твердости и прочности не только при 20 °С, но и при температурах, достигающих 800 °С. При относительной электропроводности, равной 70–75 %, дисперсно-упрочненная медь обладает следующими

механическими свойствами: твердость НВ 180–220, предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 700\text{--}900$  МПа,  $\sigma_B^{500} = 400$  МПа, относительное удлинение 2–4 %, температура рекристаллизации 850 °С. Как следует из данных, представленных в табл. 2, разработанные в Белорусско-Российском университете материалы по комплексу физико-механических свойств превосходят лучший классический электродный материал, которым является бронза БрХЦр, а также внутренне окисленную медь и дисперсно-упрочненный композиционный материал производства «Уралэлектромедь».

Табл. 2. Физико-механические свойства перспективных электродных материалов

Состав композиции, %	Физико-механические свойства						
	НВ, МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\rho \cdot 10^{-8}$ , Ом·м	НВ <sup>500</sup> , МПа	$\sigma_{100}^{500}$ , МПа	$\sigma_B^{500}$ , МПа	$t_{рек}$ , °С
Внутренне окисленная Cu	140	465	>2,11	–	<190	–	700
Механически легированная ДУКМ «Уралэлектромедь»	145	350	2,823	–	–	–	800
БрХЦр	140	500	2,059	40	185	280	500
Разрабатываемые материалы Al(0,8), MoO <sub>3</sub> (2,13)	220	900	2,216	70	250	400	850

Основные преимущества предлагаемого материала по сравнению с бронзой БрХЦр заключаются в следующем: 1) высокие значения твердости и горячей твердости приводят к снижению абразивного износа и вероятности «прихватывания» ТПН к электродной проволоке; 2) в процессе сварки рекристаллизация и разупрочнение материала выступов на контактных поверхностях ТПН происходит при температурах, превышающих аналог на 350 °С; 3) при близких значениях основных теплофизических характеристик горячая прочность дисперсно-упрочненной меди намного выше, что приводит к ослаблению процесса разрушения поверхности контакта в результате растрескивания и отторжения частиц материала в твердом состоянии под воздействием термоударов, а также снижает количество пе-

реносимого в дуге материала, потери вещества при испарении и разбрызгивании, вызываемом воздействием термоупругой волны, благодаря измельчению зерна и торможению диффузионных процессов на рабочих поверхностях; 4) в связи с тем, что у дисперсно-упрочненной меди катодные пятна распределяются на большей поверхности (они концентрируются на границах раздела фаз), это затрудняет образование единой расплавленной области и значительно уменьшает эрозию контактов; 5) наличие 1,5 % по массе дисперсных частиц оксида алюминия приводит к существенному ухудшению условий смачивания и снижению эффекта прилипания брызг и сплавления с электродной проволокой; 6) входящие в состав материала частицы  $Al_2O_3$  разрушают пленки на

поверхности движущейся электродной проволоки, что обеспечивает снижение контактного сопротивления.

Сравнительные производственные испытания, проведенные на ряде промышленных предприятий (ОАО «Мотовело», Минский автозавод, Горьковский автозавод, Могилевский автозавод, Брестский завод «Газоаппарат» и др.), показали, что при равных стоимостях изделий стойкость ТПН, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди по технологии, разработанной в Белорусско-Российском университете, превышает стойкость аналогичных наконечников, изготовленных из бронзы БрХЦр в 2,5–3,0 раза.

### Заключение

Долговечность и надежность токоподводящих наконечников могут быть многократно повышены применением для их изготовления композиционного материала – дисперсно-упрочненной меди, теория и технология производства которой разработаны и освоены в Белорусско-Российском университете. Предлагаемый материал имеет высокую степень упрочнения, в связи с развитой поверхностью границ зерен и субзерен, закрепленных и стабилизированных дисперсными частицами упрочняющей фазы. Он обладает структурой, оптимальной для сильноточных скользящих контактов: микрокристаллического типа с размером зерен 0,2–0,5 мкм и величиной частиц упрочняющей фазы менее 0,05 мкм.

Основные преимущества предлагаемого материала по сравнению с аналогами заключаются в более высоких значениях твердости и горячей твердости, температуры рекристаллизации, жаропрочности, снижении эффекта прилипания брызг и сплавления с электродной проволокой, в равномерном распределении на большей поверхности катодных пятен, что в итоге снижает эрозионный и абразивный износ токоподводящих наконечников. Разработанные материалы по комплексу физико-механических свойств значительно превосходят лучший классический материал

для токоподводящих наконечников, которым является бронза БрХЦр.

В Белорусско-Российском университете были разработаны технические условия на эту продукцию и налажено крупносерийное производство наконечников из дисперсно-упрочненной меди, имеющих стойкость, превышающую стойкость любых аналогов, выпускаемых в странах СНГ, что позволило ряду крупных предприятий РБ отказаться от импорта этих изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дмитрик, В. В.** Токоподводящие мундштуки из порошковых материалов для сварочных горелок / В. В. Дмитрик, С. И. Притула // Автоматическая сварка. – 2005. – № 3. – С. 45–47.
2. **Теодорович, О. К.** Способ повышения работоспособности сильноточных контактов электрокоммутирующих аппаратов / О. К. Теодорович, В. Я. Бригидин, Р. И. Крыжановская // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1981. – С. 155–158.
3. Структурная приспособляемость электроконтактных материалов / Б. И. Костецкий [и др.] // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1981. – С. 117–122.
4. **Костецкий, Б. И.** Металлофизические проблемы надежности и долговечности машин / Б. И. Костецкий, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов // Металлофизика. – 1973. – № 48. – С. 3–23.
5. **Братерская, Г. Н.** Ранговая корреляция факторов, определяющих работоспособность скользящих контактных пар / Г. Н. Братерская, В. Г. Затовский // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1981. – С. 80–85.
6. **Мерл, В.** Электрический контакт / В. Мерл. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 80 с.
7. **Намигоков, К. К.** Электроэрозионные явления / К. К. Намигоков. – М. : Энергия, 1978. – 455 с.
8. Спеченные материалы для электротехники и электроники : справочник / Г. Г. Гнесин [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 344 с.
9. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого. – Л. : Энергия, 1976. – 896 с.
10. **Таев, И. С.** Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М. : Энергия, 1973. – 423 с.

11. **Ведеменков, Н. А.** Об особенностях электрической эрозии контактов под воздействием дуги отключения / Н. А. Ведеменков, А. П. Кресанова, Р. В. Минакова // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1981. – С. 18–25.

12. **Левченко, Г. В.** Разрывные контакты электрических аппаратов / Г. В. Левченко, В. И. Раховский, О. К. Теодорович. – М. : Энергия, 1966. – 295 с.

13. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М. : Наука, 1970. – 426 с.

14. **Nicolas, M.** The influence of oxygen on melting and bonding in copper-tungsten system / M. Nicolas, D. Pool // J. Mat. Sci. – 1967. – № 2. – P. 269–274.

15. **Братерская, Г. Н.** Серебро, упрочненное

окислами, как композиционный электроконтактный материал / Г. Н. Братерская, Т. А. Донцова // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1981. – С. 62–65.

16. **Дорошкевич, Е. А.** Влияние включений с низкой работой выхода электрона на электроэрозионные характеристики порошковой меди / Е. А. Дорошкевич, В. М. Горохов, С. О. Головкин // Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности : сб. науч. тр. – Киев, 1989. – С. 47–54.

17. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 264 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 05.02.2008

**F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko, A. I. Khabibullin**  
**Analysis of operating conditions of current conducting tags and creation of highly resistant nanostructural material for their production**

Analysis of operating conditions of current conducting tags for wire welding in carbonic acid atmosphere has been conducted. Contact wear process – «current conducting tag – electrode wire» and factors influencing the destruction of contact surfaces have been studied. The list of the main characteristics and physic and chemical properties which must be possessed by the material for sliding contacts and their desirable quality level is given in the article. Perspective directions in operation properties improvement of tags have been named. Compositional powder highly resistant material based on copper has been suggested.