

Нанокomпозиционные материалы на основе порошковой меди для электродов точечной контактной сварки оцинкованных сталей

Е. П. Шалунов^{1,2}, В. М. Смирнов¹

¹Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова,
Чебоксары, Россия, e-mail: shalunov2003@mail.ru

²ООО "Диском Групп", Чебоксары, Россия,
e-mail: info@discom-group.ru

Разработаны электродные нанокomпозиционные материалы на основе порошковой меди с электропроводностью более 85% IACS и температурой рекристаллизации свыше 800 °С, получаемые с использованием метода реакционного механического легирования. Эффективность применения этих материалов в электродах подтверждена результатами сравнительных производственных испытаний при контактной точечной сварке оцинкованных сталей.

Ключевые слова: порошковая медь, реакционное механическое легирование, нанокomпозиционные материалы, электроды контактной сварки, оцинкованная сталь, ресурс.

Основные требования к материалам электродов для контактной точечной сварки оцинкованных сталей

К настоящему времени работами многочисленных зарубежных и отечественных ученых и специалистов установлено, что основными проблемами процесса контактной точечной сварки оцинкованных сталей являются [1, 2] недостаточная стабильность процесса сварки и склонность к непроварам и выплескам, а также низкая стойкость электродов при сварке.

В процессе сварки происходят диффузия цинкового покрытия в материал электрода и растворение цинка в матрице меди с образованием сплава латуни. Затем образуется сплав чистого цинка, при этом растет толщина цинковой прослойки. Одновременно с этим наблюдается увеличение диаметра контактной поверхности электродов и уменьшение их твердости. Все эти факторы ухудшают качество сварных соединений в процессе постановки большого количества сварных точек и резко снижают стойкость электродов при сварке [1].

Наличие покрытия на поверхности стального листа и увеличение в процессе сварки диаметра контактной поверхности электродов вызывают необходимость увеличения силы сварочного тока для получения ядра сварной точки заданных размеров по сравнению со сваркой стали без покрытия, что также приводит к снижению стойкости электродов при сварке.

Увеличение силы сварочного тока сопровождается дополнительным разогревом электродов и, соответственно, еще большим деформированием

их контактной поверхности, если они имеют малую прочность при температурах нагрева контактной зоны электродов, которая может достигать при роботизированной сварке оцинкованных стальных изделий 750 °С [3, 4].

Таким образом, наиболее востребованными материалами для электродов контактной точечной сварки оцинкованных сталей являются те, которые обладают, помимо хорошей электро- и теплопроводности, электроэрозионной стойкости, также высокой жаропрочностью, благодаря которой удается сохранять первоначальные геометрические параметры электродов более длительный период времени, тем самым увеличивая их ресурс [3—5].

Кроме того, такие материалы должны иметь антиадгезионные свойства по отношению к цинковому покрытию, быть недорогими и легковоспроизводимыми в промышленных условиях, а также обеспечивать возможность изготовления электродов методами объемной холодной штамповки, то есть обладать соответствующей пластичностью.

Современные материалы для электродов контактной сварки

С учетом указанных требований в качестве основы для электродов контактной сварки должна служить медь, уже нашедшая широкое применение в существующих электротехнических сплавах и электроконтактных материалах [3—6].

Так, в дисперсионно-твердеющих медных сплавах для придания им более высоких прочностных свойств медную основу подвергают легированию, но лишь такими элементами, которые значительно повышают прочность и в меньшей степени влияют на снижение ее электропроводности. В частности, легирование ведется добавками серебра, кадмия, хрома, циркония, магния. Так, например, при введении в медь 1% (мас.) Zr или Cr твердость повышается в 2,5 раза, а электропроводность уменьшается на 25—30%. [6]. Но у таких медных сплавов прочностные характеристики сохраняются лишь до температур, равных 0,5—0,6 температуры плавления $T_{пл}$ меди, а уже при $0,7T_{пл}$ они приближаются к прочностным характеристикам чистой меди. Например, лучшая электротехническая хромоциркониевая бронза БрХ1Цр имеет температуру рекристаллизации не выше 525 °С [5].

Разработанные дисперсионно-твердеющие порошковые бронзы для электродов контактной сварки систем Cu—Ni—Si и Cu—Co—Si [7] могут эксплуатироваться при более высоких температурах, однако процесс их получения достаточно трудоемок, а об антиадгезионных свойствах по отношению к цинку ничего неизвестно.

В отличие от упомянутых дисперсионно-твердеющих сплавов, где существование дисперсной фазы-упрочнителя зависит от температуры (при высоких температурах она растворяется в матрице), дисперсно-упрочненные материалы [8] содержат дисперсные равномерно распределенные тугоплавкие частицы, которые не растворяются в матрице и не взаимодействуют с ней вплоть до температуры ее плавления. Этим обуславливаются наилучшие прочностные характеристики материалов данного класса при высоких температурах.

Так, приведенные в работе [9] литые композиционные сплавы с медной матрицей, упрочненной частицами карбида хрома размерами не более 1 мкм, действительно обладают более высокими прочностью и температурой рекристаллизации, чем техническая и легированная медь, но имеются проблемы получения электродов с однородным распределением в них дисперсной упрочняющей фазы.

Известно, когда размеры указанных частиц в дисперсно-упрочненных материалах не превосходят 100 нм, такие материалы относят к нанокпозиционным [10, 11]. Одной из перспективных технологий создания нанокпозиционных материалов с дисперсно-упрочненной структурой является основанная на методе реакционного механического легирования [3, 4, 12], используемого авторами настоящей работы с середины 80-х годов при разработке и производстве таких материалов на основе порошков легких и цветных металлов. Эта технология предусматривает обработку в высокоэнергетической шаровой мельнице, в частности в атриторе, не просто готовой смеси порошков матрицы и фазы-упрочнителя, а порошка матрицы и добавленных в него порошков, которые обеспечивают получение этой фазы в результате механо-химического синтеза при размоле и дальнейшего передела продукта размолы (гранул) по технологиям порошковой и гранульной металлургии.

С использованием этой технологии в России изготавливается целая гамма нанокпозиционных материалов на основе порошковой меди систем Cu—Al—C—O, Cu—Ti—C—O, Cu—Cr—C—O, Cu—Al—Ti—C—O под торговой маркой ДИСКОМ® (DISCOM®) различных областей применения [12]. Благодаря наличию в них динамически термостабильных фаз-упрочнителей нанодисперсного (25—40 нм) уровня, а также сильно развитой субзеренной структуре с размерами субзерен 80—160 нм эти материалы имеют чрезвычайно высокую температуру рекристаллизации, составляющую в зависимости от химического состава и технологических режимов изготовления от $0,76T_{пл}$ до $0,92T_{пл}$. Однако в большинстве случаев эти материалы имеют электропроводность не более 50% от электропроводности чистой меди, что не всегда достаточно для эффективного применения их также в качестве материалов для электроконтактных элементов.

Как показали проведенные авторами исследования [13—15], основной причиной недостаточной электропроводности материалов, например системы Cu—Al—C—O (в частности, материала ДИСКОМ® C0/70), является неполное окисление в процессе реакционного механического легирования введенного в матричную медь алюминия и образование твердого раствора в решетке меди Cu(Al).

Для значительного повышения электропроводности нанокпозиционных материалов системы Cu—Al—C—O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования, авторами в работе [15] рекомендуется в исходную смесь порошков меди, алюминия и графита дополнительно вводить порошок оксида меди, а также проводить дополнительную термообработку получаемых в атриторе гранул. В результате обеспечивается полное окисление алюминия и получение дисперсно-упрочненного нанокпозиционного материала на основе меди Cu—Al₂O₃ повышенной электропроводности.

В табл. 1 приведены химические составы нанокпозиционных материалов на основе меди, изготовленных с учетом данных рекомендаций из смеси порошков меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), алюминия ПП-1 (ГОСТ 5592-71), графита карандашного ГК-3 (ГОСТ 4404-78) и оксида меди CuO ЧДА (ГОСТ 16539-79).

В табл. 2 представлены основные физико-механические свойства горячехлудированных прутков диаметром 16,3 мм из материалов с условным обозначением МАГ 50-25К и МАГ 80-15КС, полученных при степени вытяжки, равной 25, в сравнении с традиционной отечественной

Т а б л и ц а 1. Химические составы исходных порошковых смесей наноструктурных материалов

Материал	Содержание элементов, % (мас.)			
	Al	C	CuO	Cu
МАГ 40-20К	0,40	0,20	2,12	Остальное
МАГ 50-25К	0,50	0,25	2,64	Остальное
МАГ 80-15КС	0,80	0,15	3,50	Остальное

электротехнической бронзой БрХ1Цр и порошковым дисперсно-упрочненным композиционным материалом (ДУКМ) Cu—Al₂O₃ торговой марки GlidCop® AL-60 (США), широко используемыми для производства штампованных электродов контактной точечной сварки.

Как следует из табл. 2, разработанные материалы не уступают по температуре рекристаллизации дисперсно-упрочненному композиционному материалу Cu—Al₂O₃ торговой марки GlidCop® AL-60 и существенно превосходят его по электро- и теплопроводности, однако уступают ему по пластическим свойствам. В связи с этим при изготовлении из разработанных материалов электродов методом холодной объемной штамповки в некоторых из них возникали трещины, в том числе скрытые, по которым могло произойти разрушение электрода во время сварки. Поэтому основным способом изготовления электродов из указанных материалов являлось точение и сверление в них водоохлаждающего канала, что повышало их стоимость из-за значительного количества отходов при механической обработке.

Указанным способом из всех материалов, представленных в табл. 1, изготовлены электроды наружным диаметром 16 мм, которые подвергли производственным испытаниям на автозаводе FORD в городе Детройте (США) при контактной точечной сварке изделий толщиной 0,8 + 0,8 мм из оцинкованной малоуглеродистой стали марки G60 в сравнении с применяемыми на этом заводе электродами из циркониевой бронзы CuZr 328

Т а б л и ц а 2. Основные физико-механические свойства различных электродных материалов на основе меди

Характеристика	БрХ1Цр	GlidCop® AL-60	Разработанные материалы	
			МАГ 50-25К	МАГ 80-15КС
Абсолютная плотность при 20 °С, г/см ³	8,90	8,81	8,57	8,55
Теплопроводность, Вт/м·К	320	287	330	309
Температура рекристаллизации, °С	550	860	870	850
Относительная электропроводность при 20 °С, % IACS	75	78	85	80
Твердость по Бринеллю НВ 5/750/30 при 20 °С	155	138	140	178
Предел прочности при растяжении при 20 °С, МПа	490	513	492	496
Относительное удлинение при 20 °С, %	15,0	20,5	15,0	14,0



Рис. 1. Циклограмма сравнительных производственных испытаний электродов из различных материалов на основе меди при точечной контактной сварке листовой оцинкованной стали G60: ▲ — МАГ 80-15КС; ○ — CuZr 328; □ — МАГ 40-20К; ■ — МАГ 50-25К; × — GlidCop® AL-60.

и дисперсно-упрочненного композиционного материала $\text{Cu}-\text{Al}_2\text{O}_3$ торговой марки GlidCop® AL-60. Циклограмма испытаний приведена на рис. 1.

По мере увеличения контактной поверхности электродов их подвергали автоматической заточке фрезерными головками. Испытания показали, что электроды из бронзы CuZr 328 могут использоваться при обеспечении ими не более 3200 сварных точек, тогда как электроды из материала GlidCop® AL-60 — почти 6000 сварных точек, но при этом эти электроды потребляют больший, чем другие электроды, сварочный ток — 12,5—17,5 кА.

Электроды из медного наноконпозиционного материала МАГ 80-15КС имеют примерно одинаковый ресурс с электродами из медного материала GlidCop® AL-60, но при этом потребляют сварочный ток силой 9,0—16,0 кА, что обеспечивает экономию электроэнергии сварочного производства ~30%. Кроме того, при сварке электродами из материала МАГ 80-15КС они подвергались значительно меньшему количеству заточек, чем электроды из материала GlidCop® AL-60, что существенно увеличивало производительность сварочного процесса. Объяснение снижения энергопотребления за счет эффекта "самозаточки" электродов из материала МАГ 80-15КС приводится в работах [16, 17].

Случаев адгезии электродов из материала МАГ 80-15КС к поверхности свариваемых изделий не было. Однако, несмотря на отмеченные преимущества, механообработанные электроды из материала МАГ 80-15КС из-за более высокой стоимости по сравнению со штампованными электродами из традиционных материалов не смогли им составить конкуренцию при использовании в крупносерийных и массовых сварочных производствах. В единичных и мелкосерийных производствах такие электроды находят широкое применение [18].

Наноконпозиционный материал для холодноштампованных электродов точечной контактной сварки оцинкованных сталей

С целью обеспечения возможности изготовления электродов методом холодной объемной штамповки указанные материалы подвергали усовершенствованиям, предусматривающим повышение их пластических свойств за счет:

создания беспористой структуры и более прочных связей между дискретными волокнами, образующимися из гранул во время процесса горячей экструзии, путем значительного повышения степени вытяжки при экструзии [19];

дальнейшего снижения содержания в материалах оксидов меди, отрицательно влияющих не только на их электропроводность, но и на пластичность, путем введения в них дополнительно раскислителя в виде фосфористой меди [9, 20].

Порошки меди ПМС-1, алюминия ПП-1, графита карандашного ГК-3, оксида меди CuO ЧДА и фосфористой меди МФ10 (ГОСТ 4515-93) смешивали в определенных пропорциях в течение 30 мин в биконическом смесителе. Далее порошковую смесь подвергали высокоэнергетической обработке в атриторе в течение 60 мин при потребляемой энергии 5 кВт на 1 кг обрабатываемой порошковой смеси и соотношении масс порошковой смеси и мелющих шаров 1 : 15. Варьирование содержания порошковых компонентов в рабочей смеси проводили, согласно работе [20], в следующих пределах (% (мас.)): Al — 0,2—0,3; C — 0,1—0,2; CuO — 1,15—1,45; CuP — 0,05—0,15; Cu — остальное.

Полученные в результате такой высокоэнергетической обработки гранулы в холодную прессовали на гидропрессе давлением 400 МПа в цилиндрические пористые брикеты, которые затем устанавливали в технологические капсулы, заполненные карбюризатором, и помещали в камерную электропечь, где они нагревались при температуре 800 °С и с этой температуры подвергались экструдированию на гидропрессе давлением 850 МПа при степени вытяжки, равной 78, в прутки диаметром 16,3 мм.

В результате высокоэнергетической обработки порошковой смеси в атриторе и дальнейшей термомеханической обработки полученных гранул компоненты порошковой смеси и кислород воздуха вступали в твердофазные химические реакции, в результате которых кислород воздуха и оксида меди образовывали с алюминием оксид алюминия, медный порошок окислялся кислородом воздуха до оксидов меди, которые затем восстанавливались углеродом графита.

Фосфор, содержащийся во введенной в исходную порошковую смесь фосфористой меди МФ10 (Cu—10% (мас.) P), вступал в реакцию с оксидами меди CuO и Cu_2O , восстанавливая их до чистой меди, и тем самым усиливал эффект освобождения (восстановления) материала от вредных для его электропроводности и пластичности частиц CuO и Cu_2O . Кроме того, легкоплавкая эвтектика CuP способствовала смачиваемости дисперсных частиц оксида алюминия и лучшему их соединению с медной основой материала. Поскольку при этом образовывался также побочный продукт указанных химических реакций — P_2O_5 -, снижающий электропроводность материала, количество вводимой в исходную порошковую смесь фосфористой меди было незначительным. Фосфористая медь в данном случае была призвана ограничить содержание вводимого в исходную порошковую смесь углерода (графита), как основного восстановителя CuO и Cu_2O , ибо при повышенном содержании этого элемента в медном композиционном материале увеличивается его пористость, снижаются электропроводность и пластичность [14].

Чтобы углекислый газ, образующийся при восстановлении углеродом оксида и закиси меди, имел возможность выйти из изготавливаемого

материала, его гранулы, как уже указывалось, подвергали холодному прессованию в брикет, который имел поры. При дальнейшем нагреве спрессованного пористого брикета углекислый газ выходил в атмосферу через его поры.

Далее нагретый спрессованный пористый брикет экструдировали. При прохождении брикета через фильеру пресс-инструмента его поперечные размеры многократно уменьшались, и он, таким образом, превращался в высокоплотный профиль. Неполностью удаленный при нагреве пористой заготовки углекислый газ во время этой операции вытеснялся при большом давлении экструзии и высокой степени вытяжки за пределы деформируемого тела, обеспечивая в конечном итоге беспористое и, соответственно, свободное от газов состояние. Это, как уже указывалось, должно было придать полученному композиционному материалу повышенные электропроводность и пластичность.

В результате проведенных исследований удалось получить материал, обозначенный как МАГ 25-10-5КС, состав и свойства которого соответствовали приведенному в работе [20] нанокomпозиционному материалу системы Cu—Al—C—CuO—CuP—O . В частности, он имеет температуру рекристаллизации $840\text{ }^\circ\text{C}$, электропроводность — 87% IACS, предел прочности при растяжении — 445 МПа, относительное удлинение — 22% и относительную осадку до разрушения — 65%.

Описанными в работах [13—15, 20] методами исследований установлено, что фазовый состав упрочняющих частиц соответствует $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, а их размеры составляют 28—55 нм.

Из материала МАГ 25-10-5КС методом объемной холодной штамповки получали электроды колпачкового типа F16 по ISO 5821:2009, которые

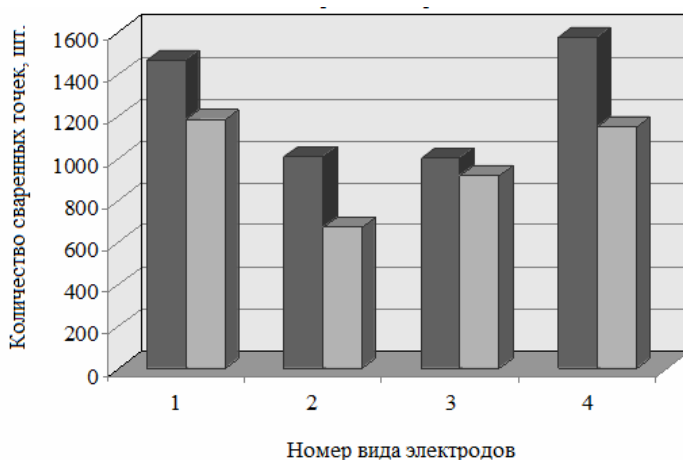


Рис. 2. Результаты сравнительных производственных испытаний холодноштампованных колпачковых электродов типа F16 из медного ДУКМ $\text{Cu—Al}_2\text{O}_3$ разных фирм: GlidCop® AL-60 (США) (1); компании "Lepert" ECKA Discup® VP-2 (Германия) (2); компании AEG AG ECKA Discup® VP-2 (Германия) (3) и разработанного нанокomпозиционного материала $\text{Cu—Al}_2\text{O}_3$ МАГ 25-10-5КС (Россия) (4) при точечной контактной сварке оцинкованной малоуглеродистой стали: ■, □ — первый и второй режимы сварки.

подвергали ускоренным испытаниям на автозаводе DaimlerChrysler (Германия) при сварке изделий из оцинкованной тонколистовой стали. Для сравнения в таких же условиях испытывали электроды из порошкового дисперсно-упрочненного композиционного материала Cu—Al₂O₃ торговых марок GlidCop® AL-60 ECKA DISCUP® (Германия). Ускоренные испытания осуществляли при двух режимах сварки по принятой на данном предприятии методике, предусматривающей варьирование как силы сварочного тока, усилия прижима, темпа сварки, так и скорости охлаждения электродов. Результаты сравнительных испытаний представлены на рис. 2.

Проведенные испытания показали, что ресурс электродов из материала МАГ 25-10-5КС в 1,3—1,7 раза превышает ресурс электродов из медного дисперсно-упрочненного композиционного материала ECKA DISCUP® VP-2 и соответствует ресурсу электродов из материала GlidCop® AL-60. При этом каких-либо проблем с привариванием электродов из материала МАГ 25-10-5КС к поверхности оцинкованной стали не возникало. Стоимость холодноштампованных электродов из разработанного материала ниже стоимости электродов из материала GlidCop® AL-60, что делает их потенциально экспортнопригодными.

Выводы

Разработанные наноконпозиционные материалы систем Cu—Al—C—CuO—O и Cu—Al—C—CuO—CuP—O могут применяться для изготовления электродов контактной точечной сварки оцинкованных сталей.

Ресурс таких электродов почти в 2 раза превосходит ресурс аналогичных электродов из циркониевой бронзы CuZr 328 и соответствует таковому электродов из порошкового дисперсно-упрочненного композиционного материала Cu—Al₂O₃ GlidCop® AL-60.

Применение электродов из разработанных наноконпозиционных материалов вместо электродов из GlidCop® AL-60 может обеспечить экономии электроэнергии сварочного производства ~30%.

1. *Вакатов А. В.* Исследование процесса и разработка технологии контактной точечной сварки оцинкованной стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тольятти : Тольятт. политехн. ин-т, 1990. — 20 с.
2. *Емельянов С. Н.* Контактная сварка оцинкованных сталей с сохранением защитного покрытия посредством регулирования термомеханических параметров процесса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2010. — 20 с.
3. *Шалунов Е. П.* Высокоресурсный сварочный инструмент из дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе порошковой меди. — Чебоксары : ИНТЦ "ДИСКОМ", 2003. — 257 с.
4. *Шалунов Е. П.* Высокоресурсные электроды контактной сварки из медных композиционных материалов с нанодисперсными упрочняющими фазами / Е. П. Шалунов, В. А. Довыденков // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2004. — С. 190—201.
5. *Николаев А. К.* Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. — М. : Металлургия, 1978. — 96 с.
6. *Колачев Б. А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / [Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин и др.]. — М. : Металлургия, 1981. — 416 с.
7. *Иванова И. И.* Дисперсно-твердеющие порошковые бронзы для электродов контактной сварки / И. И. Иванова, Н. А. Крылова, С. И. Евлаш

- // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2014. — С. 90—96.
8. *Портной К. И.* Дисперсно-упрочненные материалы / К. И. Портной, Б. Н. Бабич. — М. : Metallurgia, 1974. — 199 с.
 9. *Трунова А. И.* Технологические особенности получения медно-матричных композиционных сплавов электротехнического назначения // Труды XII съезда литейщиков России. — Н. Новгород : НГТУ, 2015. — С. 282—286.
 10. *Скороход В. В.* Некоторые проблемы технологии получения, исследования структуры и свойств наноструктурных материалов // Нанокристаллические материалы. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 1998. — С. 4—13.
 11. *Валиев Р. З.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. Э. Валиев, И. В. Александров. — М. : ИКЦ "Академкнига", 2007. — 398 с.
 12. *Шалунов Е. П.* Жаро- и износостойкие медные гранулированные композиционные материалы с механохимически синтезированными упрочняющими наночастицами ДИСКОМ® и высокоресурсная продукция из них // Нанотехника. — 2007. — № 1 (9). — С. 69—78.
 13. *Шалунов Е. П.* Особенности формирования объемных наноструктурных материалов на основе меди методом реакционного механического легирования / Е. П. Шалунов, В. М. Смирнов // Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. — 2009. — № 2. — С. 291—299.
 14. *Шалунов Е. П.* Реакционное механическое легирование порошковой меди кислородом и углеродом // Е. П. Шалунов, В. М. Смирнов, А. Л. Матросов // Там же. — 2012. — № 3. — С. 252—259.
 15. *Шалунов Е. П.* О механизмах формирования структуры и свойств композиционных материалов системы Cu—Al—C—O, получаемых на основе метода реакционного механического легирования / Е. П. Шалунов, В. М. Смирнов // Там же. — 2013. — № 3. — С. 314—322.
 16. *Харитонов Е. О.* Разработка материалов для силовых разрывных и дугостойких электрических контактов с повышенными эксплуатационными характеристиками, используемых на железнодорожном транспорте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М. : ВНИИЖТ, 2007. — 24 с.
 17. *Shalunov E. P.* Development, production and application of DISCOM® copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials / E. P. Shalunov, A. L. Matrosov, L. Chen // Proc. of Internat. Powder Metallurgy Congress (EURO PM2008), Mannheim, 2008, sept. 29—oct. 1. — Vol. 1. — Shrewsbury : EPMA, 2008. — P. 113—119.
 18. *Шалунов Е. П.* Объемные наноструктурные материалы для контактов: разработка, производство, применение, реализация / [Е. П. Шалунов, И. Е. Илларионов, А. Л. Матросов и др.] // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: Материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 22—24 окт. 2015 г. — Чебоксары : Чуваш. гос. ун-т, 2015. — С. 351—365.
 19. *Шалунов Е. П.* Влияние степени вытяжки при горячем прессовании прутков из дисперсно-упрочненного композиционного материала Cu—Al—C—O на их структуру и свойства / Е. П. Шалунов, А. Л. Матросов, Д. В. Казаков // Материаловедение и металлургия: Труды Нижегород. гос. техн. ун-та. — Н. Новгород : НГТУ, 2006. — Т. 57. — С. 163—169.
 20. *Пат. 2398656 России.* Способ изготовления композиционного материала для электрических контактов на медной основе / Е. П. Шалунов, И. С. Гершман. — Оpubл. 10.09.2010 г.

Наноконпозиційні матеріали на основі порошкової міді для електродів точкового контактного зварювання оцинкованих сталей

Є. П. Шалунов, В. М. Смирнов

Розроблено електродні наноконпозиційні матеріали на основі порошкової міді з електропровідністю більше 85% IACS і температурою рекристалізації вище 800 °С, які одержують з використанням методу реакційного механічного легування. Ефективність застосування цих матеріалів в електродах підтверджено результатами порівняльних виробничих випробувань при контактному точковому зварюванні оцинкованих сталей.

Ключові слова: порошкова мідь, реакційне механічне легування, наноконпозиційні матеріали, електроди контактного зварювання, оцинкована сталь, ресурс.

Nanocomposite materials based on powder copper for the electrodes of resistance spot welding galvanized steels

E. P. Shalunov, V. M. Smirnov

Electrode nanocomposite materials on the basis of powder copper with conductivity more than 85% of IACS and with the temperature of recrystallization over 800 °C, received with use of a method of a reactionary mechanical alloying are developed. The efficiency of these materials in the electrodes is confirmed by results of comparative field testing in resistance spot welding of galvanized steels.

Keywords: powder copper, reactionary mechanical alloying, nanocomposite materials, electrodes of resistance welding, galvanized steel, resource.