

УДК 621.79

В. М. Константинов

Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПЛАВОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Изучено влияние комплексного легирования меди хромом и углеродом, а также хромом и бором на свойства наплавленных слоёв на восстановленных электродах контактной сварки арматуры железобетонных конструкций. Установлено повышение твёрдости и электропроводности наплавленного слоя системы Cu-Cr-B за счёт уменьшения размера зерна и дополнительного образования вторичных боридов хрома.

Ключевые слова: наплавочный сплав, электрод контактной сварки, легирование хромом и бором.

Введение. При эксплуатации рабочая поверхность электрода для контактной сварки (далее — ЭКС) арматуры железобетонных конструкций подвергается ряду внешних воздействий, обуславливающих интенсивное разрушение ЭКС. Как правило, разрушение выражается либо в увеличении диаметра рабочей части более допустимого, либо в увеличении выемки от свариваемой арматуры. И в том, и в другом случае приходится снимать верхний дефектный слой металла механической обработкой. Стойкость ЭКС относительно невелика и в зависимости от условий работы и материала колеблется от 1 000 до 10 000 точек сварки. Восстановление ЭКС, являясь очевидным эффективным решением, тем не менее представляет значительные трудности, в первую очередь технико-экономического характера. Стоимость ЭКС мала, поэтому сплав для восстановления, обеспечивая высокую стойкость ЭКС, должен иметь минимальную стоимость для обеспечения технико-экономической эффективности реновационной технологии.

Целью работы является исследование влияния ряда легирующих элементов на свойства наплавочных сплавов на медной основе для восстановления электродов контактной сварки арматуры железобетонных конструкций.

Анализ условий работы электродов контактной сварки и требования к сплавам для восстановления. В процессе работы ЭКС происходит разупрочнение его рабочей части. Толщина разупрочнённого слоя колеблется от 1,5 до 3,5 мм. Изменение контактной поверхности электродов и их свойств в процессе сварки находится в соответствии с изменением структуры электродного материала. Рекристаллизация в наиболее нагруженных областях начинается уже после 200 точек сварки. С увеличением числа точек сварки в процессе рекристаллизации материала ЭКС вовлекаются новые слои контактной поверхности от центра к краю. С увеличением числа сварок рекристаллизованные зёрна укрупняются, падает твёрдость.

Результаты выполненного фазового анализа изношенного ЭКС (таблица 1) свидетельствуют о следующем: в процессе работы электрода его рабочая часть механически захватывает частицы свариваемой стали. Как медь электрода, так и железо свариваемой арматуры активно окисляются; окисление меди происходит даже активнее, чем при её выплавке: плавленная медь, как правило, содержит закись Cu_2O [1], тогда как поверхность электрода — оксид меди CuO . Медь электрода почти не легируется железом (так как длительность взаимодействия невелика), а железо — медью. Уменьшение периода решётки меди является следствием возникновения высоких внутренних напряжений растяжения: они превышают 600 МПа, что приводит к расплющиванию конца электрода. Исходное нагартованное состояние сплава электрода снимается в процессе работы. Это подтверждается сравнением размеров блоков и уровня микронапряжений.

Аналогичные результаты получены авторами [2], [3] при изучении ЭКС для точечной сварки листовых сталей. Ими установлено, что в процессе сварки происходит как первичная, так и собирательная

Т а б л и ц а 1 — Результаты фазового рентгеноструктурного анализа изношенного медного ЭКС

Определяемые параметры		Рабочая изношенная поверхность электрода	Крепёжная (нерабочая) часть электрода
Фазовый состав: фаза (число линий) / процент по объёму		Cu / 6 / 33; Fe _α / 6 / 27; Fe ₃ O ₄ / 9 / 9; Fe ₂ O ₃ / 9 / 16; CuO / 23 / 13	Cu / 6 / 100
Периоды решёток, ангстрем: эталон / опыт	Cu	3,615 / 3,6087	3,615/3,6163
	Fe _α	2,8664 / 2,8665	—
Остаточные напряжения I рода в меди, МПа		630	—
Размер блоков мозаики, ангстрем		20,25	11,75
Остаточные микронапряжения II рода, МПа		350	600

рекристаллизация. Однако если при обычной статической собирательной рекристаллизации мелкие зёрна постепенно исчезают и размер всех зёрен стремится к некоторому конечному значению, то в случае рекристаллизации электродного материала этого не происходит: доля зёрен всех размеров (по числу и по площади) при сварке свыше 2 000 точек остаётся практически постоянной. При этом мелкие рекристаллизованные зёрна располагаются по границам крупных рекристаллизованных зёрен. Указанные особенности характерны для динамической рекристаллизации.

Результаты выполненного анализа и данные других авторов [2], [3], [4], [5], [6] позволяют выделить следующие ведущие процессы, ответственные за разрушение рабочей поверхности ЭКС: 1) циклический нагрев рабочей поверхности при прохождении электрического тока (часто до 400...700°C). Это приводит к рекристаллизации, росту зерна, к разупрочнению поверхности ЭКС; 2) ударное смятие рабочей поверхности ЭКС при повышенных температурах. Давление в контакте может достигать 500 МПа. При этом происходят конкурирующие процессы деформационного упрочнения — рекристаллизации. По нашему мнению, во многом наличие устойчивого динамического равновесия между этими процессами определяет стойкость электрода. Увеличение размеров блоков в анализируемом случае свидетельствует о смещении равновесия в сторону рекристаллизационных процессов и термического разупрочнения. Присутствует диффузионный и капельный массоперенос на поверхность ЭКС свариваемого металла, в изучаемом случае — железа. В неравновесных условиях циклической пластической деформации и нагрева скорость диффузии значительно возрастает. Увеличение количества железа на рабочей поверхности приводит к повышению электросопротивления, что в свою очередь увеличивает тепловыделение в контакте, приводя к дальнейшему размягчению и деформации рабочей поверхности ЭКС.

Анализ условий работы электродов контактной сварки позволяет сформулировать эксплуатационные требования к сплаву для восстановления ЭКС [1], [2], [5], [8]:

- 1) высокая электропроводимость и теплопроводность для снижения температуры в контакте «электрод—деталь», уменьшения потребления электрической мощности и предупреждения сквозного проплавления деталей (не менее 40% от электропроводимости меди);
- 2) твёрдость не менее 120 НВ для эффективного сопротивления пластической деформации;
- 3) сравнительно высокая жаропрочность и температура рекристаллизации для замедления процесса разупрочнения рабочей части ЭКС. Температура разупрочнения — не менее 350°C;
- 4) малая склонность к массопереносу, низкие коэффициенты диффузии основных элементов свариваемых деталей для повышения стойкости рабочей поверхности ЭКС к налипанию свариваемого металла;
- 5) окалиностойкость при температурах 300...500°C;
- 6) относительно низкая стоимость для обеспечения технико-экономической эффективности восстановления [9].

Отметим, что от удачного сочетания этих качеств зависит стабильность ЭКС в работе, а также качество контактной сварки и производительность сварочного оборудования. Отдельно следует сказать о требованиях к технологическим свойствам наплавочного сплава для восстановления ЭКС [2], [3], [10].

К ним относятся: невысокое сродство к кислороду легирующих элементов, по возможности небольшие потери на выгорание при наплавке, более низкая температура плавления сплава, по сравнению с восстанавливаемой медной поверхностью, флюсующе-раскисляющая способность сплава при наплавке. Таким образом, предъявляемые требования разнообразны и противоречивы. К настоящему времени разработано большое количество специальных сплавов и композиционных материалов для изготовления ЭКС. Перечень наплавочных сплавов для восстановления ЭКС значительно скромнее. На территории СНГ наиболее известны наплавочные электроды ОЗБ-3М (1,0% Cr, 2,5% Ni, 0,7% Si, остальное Cu).

Технико-экономический анализ указывает на эффективность разработки сплавов для восстановления ЭКС системы Cu-Cr (таблица 2). Сварка и наплавка меди и её сплавов затруднена из-за её высокой теплопроводности, большой жидкотекучести, способности сильно окисляться в нагретом, особенно в расплавленном состоянии. На свариваемость меди оказывают большое влияние примеси, входящие в её состав (кислород, висмут, свинец, сера, фосфор, сурьма, мышьяк). При нагревании и расплавлении медь, окисляясь, образует закись меди Cu_2O , которая, реагируя с водородом, растворённым в металле, вызывает склонность меди к водородной болезни (поверхностные трещины) и снижает её электропроводность и механические свойства [1]. Поэтому целесообразно введение в сплав элементов, обеспечивающих интенсивное восстановление оксидов меди, в качестве которых предлагается использовать углерод и бор.

Исследования наплавочных сплавов. В связи с вышеизложенным была проанализирована и экспериментально изучена возможность диффузионного легирования меди хромом, углеродом и бором. Известно, что максимальная растворимость этих элементов в меди следующая: Cr — 1,28%, В — 0,05%, С — 0,0005% мас. [11]. Анализ диаграмм состояния свидетельствует о невозможности однокомпонентного эффективного диффузионного легирования меди бором и углеродом. Однако нами предполагается, что существует возможность многокомпонентного диффузионного насыщения меди хромом и бором, а также хромом и углеродом с образованием боридов и карбидов хрома.

Были проведены исследования по однокомпонентному и многокомпонентному диффузионному легированию медной проволоки (отходы кабельного производства). Дополнительное легирование хромированной проволоки бором увеличивает микротвёрдость и толщину диффузионного слоя (рисунки 1 и 2), что вызвано наличием в этой зоне высокотвёрдых фаз боридов хрома. Это подтверждено результатами рентгеноструктурного анализа. Установлено наличие в диффузионном слое следующих фаз: Cr_3B_4 — 42%, Cr_2B — 34%, CrB_2 — 10%, CrB — 14%.

Был проведён ряд экспериментов по изучению наплавляемости исследуемых материалов. Наплавка производилась на токе 80...100 А на медный подслои. В качестве флюса использовали буру техническую (ГОСТ 13459). Наилучшие результаты по смачиваемости подслоя и отсутствию пор в наплавленном слое продемонстрировал борохромированный наплавочный электрод. Пористость наплавленного слоя не превышала 1...3%.

Металлографический анализ позволил установить существенные отличия в структуре наплавов различного состава. Наличие хрома во всех анализируемых случаях обеспечивает гетерогенизацию

Т а б л и ц а 2 — Технико-экономическая эффективность некоторых легирующих элементов при создании наплавочных сплавов на медной основе для восстановления ЭКС

Легирующие элементы, % мас.	Твёрдость, НВ	Электропроводимость к электропроводности меди, %	Температура начала рекристаллизации, °С
1,0 Cd	110	85	300
0,12 Ag	100	98	360
1,0 Cr	130	81	400
0,8 Cr; 0,15 Zr	150	78	500
1,6 Ni; 0,4 Be; 0,15 Ti	200	55	510
1 Si; 4 Ni	160	45	450

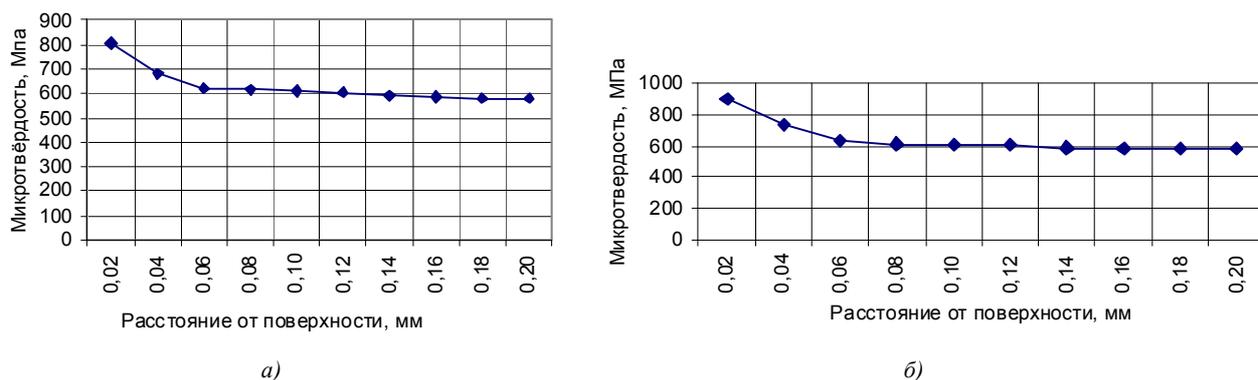


Рисунок 1 — Распределение микротвёрдости по толщине хромированного (а) и хромоборированного (б) слоёв на медном электроде диаметром 1,2 мм

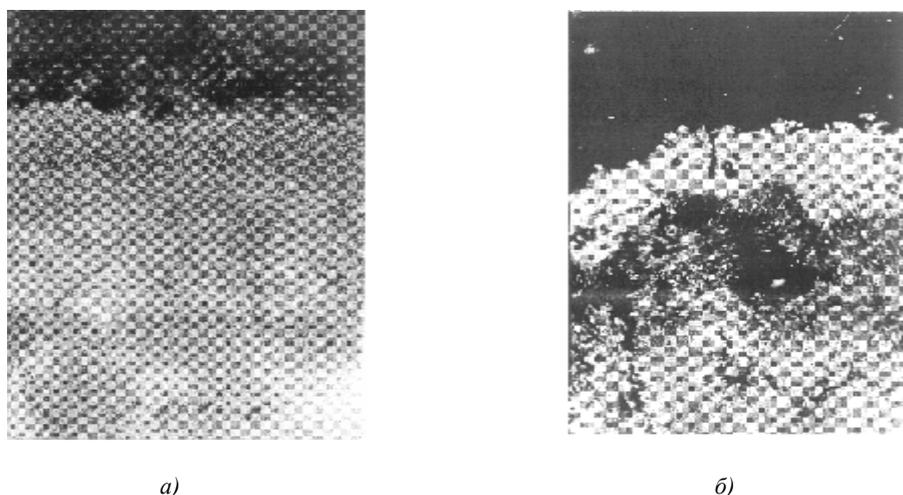


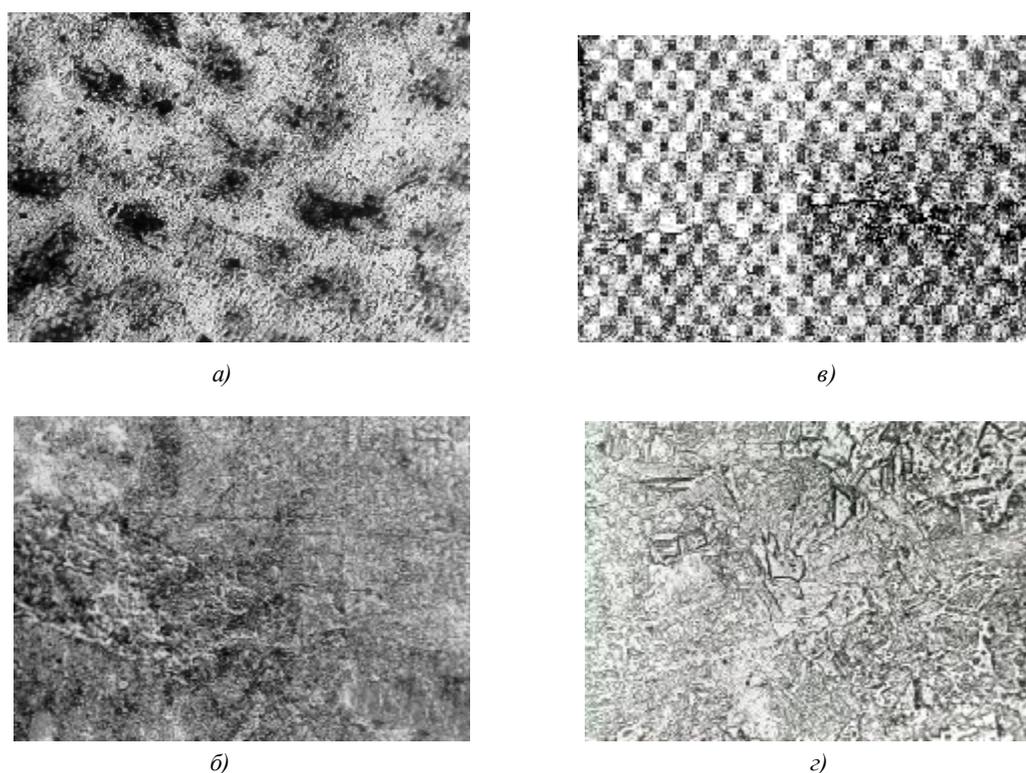
Рисунок 2 — Микроструктура диффузионного хромированного (а) и хромоборированного (б) слоёв на медном электроде диаметром 1,2. $\times 200$

структуры за счёт выпадения хромистой фазы. Однако количество упрочняющих фаз и размер зерна твёрдого раствора меди различны (рисунок 3).

Наличие в наплавочном электроде ОЗБ-3М, кроме хрома, кремния и никеля обеспечило в наплавленном слое мелкодисперсные выделения α -фазы хрома и силицидов никеля в α -твёрдом растворе меди. Необходимо отметить наличие участков повышенной травимости, возникновение которых, по нашему мнению, связано с неоднородностью химического состава наплавки. Микротвёрдость данной наплавки составила 1 070 МПа. Средний размер зерна наплавленного слоя — около 0,2 мм, что близко к размеру зерна сплавов, содержащих хром и углерод.

В случае легирования медной основы только хромом количество α -фазы существенно меньше, и располагается она по всей плоскости зерна. Преимущественной ориентации α -фазы по границам зёрен не наблюдается. Микротвёрдость наплавленного слоя — 847 МПа. Размер зерна в данной наплавке около 0,235 мм. Микроструктура наплавки, легированной хромом и углеродом, подобна предыдущей микроструктуре (см. рисунок 3, в). В данном случае наряду с α -фазой возможно присутствие карбидов хрома. Наплавленный слой, содержащий хром и углерод, имеет микротвёрдость 539 МПа. Снижение микротвёрдости медной матрицы по сравнению с предыдущим случаем является косвенным подтверждением связывания хрома в карбиды. Размер зерна в данной наплавке около — 0,205 мм.

Наличие бора в хромосодержащей наплавке вносит определённые изменения в структуру. Микроструктура данного сплава гораздо более мелкодисперсная, чем микроструктуры сплавов, содержащих хром



a — наплавочный электрод ОЗБ-3М; *б* — сплав Cu-Cr; *в* — сплав Cu-Cr-C; *г* — сплав Cu-Cr-B

Рисунок 3 — Микроструктуры наплавленных слоёв из медных сплавов. × 200

и углерод. Размер зерна данного сплава — около 0,02 мм. В микроструктуре рассматриваемого сплава могут присутствовать как первичные, так и вторичные фазы боридов хрома. Образование последних проблематично вследствие низкой растворимости бора в меди. Возможный путь трансформации структуры данного сплава при термической обработке связан, по нашему мнению, с изменением химического состава боридов хрома. Так как наиболее термодинамически устойчивыми являются бориды Cr_3B_4 , то они будут присутствовать в данном сплаве в наибольшем количестве [11]. Микротвёрдость медной основы наплавки, содержащей бориды хрома, гораздо ниже, чем у рассмотренных ранее сплавов, и составляет в среднем 439 МПа. Это вызвано уменьшением количества хрома в твёрдом растворе за счёт образования боридов хрома. Отметим, что данное обстоятельство способствует повышению электропроводности сплава. Анализ данных по изменению твёрдости анализируемых наплавков свидетельствует о наличии дисперсионного твердения в результате термической обработки (таблица 3). Наиболее высокие значения как твёрдости, так и её прироста после термообработки характерны для борсодержащей наплавки при высокой электропроводности.

Для производственной проверки полученных результатов была изготовлена партия наплавочного сплава системы Cu-Cr-B из кабельных медных отходов. Восстановление проводили электродуговой, ванной сваркой. Восстановленные ЭКС использовали при сварке арматуры железобетонных изделий (рисунок 4). В результате стойкостных испытаний подтверждена нецелесообразность наплавки чистой меди при восстановлении изношенных ЭКС. Наплавленный слой в этом случае содержит значительное количество кислорода и пор. Несмотря на деформационное упрочнение, стойкость этих электродов неудовлетворительная — интенсивный нагрев при эксплуатации снимает деформационное упрочнение, а растворённый в наплавке кислород снижает электропроводность (таблица 4).

Для повышения наплавляемости опробовано диффузионное легирование элементами, имеющими более высокое сродство к кислороду, чем медь. Наплавки с кремнием имеют значительно меньшую пористость и содержание кислорода. Однако монолегирование кремнием приводит к катастрофическому

Т а б л и ц а 3 — Твёрдость (НВ) и электропроводность (в процентах к электропроводности меди) наплавленного слоя из специальных медных сплавов

Вид термообработки наплавленного слоя	Наплавленный сплав на медной основе							
	Cu + Cr		Cu + Cr + В		Cu + Cr + С		ОЗБ 3М	
После наплавки	132 ± 16 НВ		151 ± 18 НВ		131 ± 19 НВ		105 ± 18 НВ	
Закалка (1 000°С)	86 ± 12 НВ		107 ± 14 НВ		88 ± 10 НВ		91 ± 14 НВ	
Закалка (1 000°С), Отпуск (450°С)	130 ± 9 НВ	85%	175 ± 12 НВ	88%	139 ± 14 НВ	87%	139 ± 9 НВ	81%



Рисунок 4 — ЭКС, восстановленный разработанными сплавами

прилипанию свариваемой арматуры на ЭКС в связи с раскисляющим действием кремния и интенсивным разогревом ЭКС. Дополнительное легирование кремнистой наплавки хромом повышает твёрдость, однако кремний остаётся в твёрдом растворе, поэтому интенсивно раскисляет контактные площадки до образования ювенильных поверхностей с последующим интенсивным привариванием ЭКС к стальной арматуре. Аналогичный результат получен для наплавки, имеющих комплексное легирование с участием бора без термической обработки на дисперсионное твердение. Термическая обработка наплавки, направленная на получение эффекта дисперсионного твердения, приводит к повышению твёрдости и стойкости восстановленных ЭКС. Полученные результаты свидетельствуют о возможности замены импортных наплавочных электродов на разработанные сплавы.

Т а б л и ц а 4 — Результаты стойкостных испытаний восстановленных электродов контактной сварки

Химический состав наплавляемого сплава, % мас.	Режим обработки наплавленного слоя	Твёрдость наплавленного слоя, НВ	Период стойкости ЭКС, количество смен/ количество переточек	Примечание
100 Cu	Деформационное упрочнение	55 ± 5	3/6	Содержание кислорода 0,25...0,35%. Пористость до 20%
0,9 Si; остальное Cu		72 ± 2	2/1	Пористость до 5%. Интенсивное прилипание к свариваемой арматуре после 1-й переточки. Снят с испытаний
0,9 Si; 1,2 Cr; остальное Cu		98 ± 8	4/2	Исходная пористость до 5%. Интенсивное прилипание после 2-й переточки
0,5 Si; 1,5 Ni; 0,6 Cr; остальное Cu	Трёхкратная горячая деформация. Старение 450°С; 3,5 ч	95 ± 8	12/6	Интенсивный разогрев ЭКС в начале эксплуатации
ОЗБ-3М	Закалка в воду от 950°С. Старение 450°С	149 ± 10	20/7	Повышенный разогрев ЭКС на первых 10...15 точках сварки
1,2 Cr; 0,3 В; остальное Cu	Закалка в воду от 950°С. Старение 450°С	157 ± 12	19/6	Повышенный разогрев ЭКС на первых 10...15 точках сварки.

Заключение. Изучены наплавленные слои электроконтактного назначения из диффузионно-легированных сплавов на медной основе. Изучены системы Cu-Cr, Cu-Cr-C, Cu-Cr-B, полученные диффузионным легированием медных кабельных отходов. Во всех трёх случаях наплавленный слой состоит из медной матрицы и дисперсных вторичных избыточных фаз. Наличие бора в хромсодержащей наплавке обеспечивает уменьшение размера зерна до 0,02 мкм и дополнительное дисперсное твердение после термической обработки за счёт образования вторичных боридов хрома. Это обеспечивает высокие твёрдость и электропроводность наплавленного слоя. Проведённые производственные испытания подтвердили высокую долговечность электродов контактной сварки арматуры железобетонных изделий с наплавленным слоем из разработанного сплава.

Список цитируемых источников

1. Мальцев, Н. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / Н. В. Мальцев. — М. : Металлургия, 1970. — 364 с.
2. Николаев, А. К. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, М. М. Розенберг. — М. : Металлургия, 1978. — 96 с.
3. Слиозберг, С. К. Электроды для контактной сварки / С. К. Слиозберг, П. Л. Чулошников. — Л. : Машиностроение, 1972. — 125 с.
4. Технология и оборудование контактной сварки / под ред. Б. Д. Орлова. — М. : Машиностроение, 1986. — 352 с.
5. Дубинин, Г. Н. Конструкционные, проводниковые и магнитные материалы / Г. Н. Дубинин, Ю. С. Аврамов. — М. : Машиностроение, 1973. — 296 с.
6. Гулеев, А. И. Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гулеев. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
7. Сварка и свариваемые материалы : справ. : в 3 т. / под ред. В.Н. Волченко. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. — Т. 2. Технология и оборудование. — 574 с.
8. Чулошников, П. Л. Контактная сварка / П. Л. Чулошников. — М. : Машиностроение, 1977. — 144 с.
9. Константинов, В. М. Теоретические и технологические аспекты создания экономно-легированных защитных слоёв из диффузионно-легированных сплавов / В. М. Константинов // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. — 2007. — № 2. — С. 29—37.
10. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения : справ. / И. М. Федорченко [и др.]. — Киев : Наук. думка, 1985. — 624 с.
11. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди : справ. — М. : Наука, 1979. — 247 с.

Материал поступил в редакцию 19.05.2014 г.

The influence of copper chromium and carbon, as well as chromium and boron, complex alloying on the properties of deposited layers on the electrodes of the concrete structures welding reinforcement is under study. The increase in the hardness and electrical conductivity of the deposited layer of Cu-Cr-B by reducing the grain size and additional education of secondary chromium borides has been detected.

Key words: surface alloy, electrode of welding, chromium and boron doping.