

УДК 621.74.04:620.22:669.35

Б. А. Кириевский, Ю. В. Моисеев

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМИСТЫМ ЧУГУНОМ

Представлен краткий обзор требований к электроконтактным сплавам и особенностей выплавки хромовых бронз, полученных легированием меди хромистым чугуном.

Ключевые слова: медь, хромистый чугун, сплав, плавка, перемешивание, структура.

Представлено короткий огляд вимог для електроконтактних сплавів та особливостей виплавки міді, легованої хромистим чавуном.

Ключові слова: мідь, хромистий чавун, сплав, плавка, перемішування, структура.

There are represented the short survey of demands to electrical contact alloys and peculiarity of copper alloyed chromium cast iron.

Keywords: copper, chrome iron, alloy, melt ing, mix, structure.

В электротехнической промышленности широко используют материалы, служащие для периодического замыкания и размыкания силовых электрических цепей, а также для подвижных электрических контактов. Примерами таких проводниковых устройств являются контактные электроды специальных сварочных машин, подвижные токосъёмники, используемые в качестве накладок пантографов электровозов, трамваев и др. (табл. 1).

Материалы для этих контактных проводников должны иметь повышенную электропроводность и механическую прочность; достаточно высокую твёрдость, жаростойкость и сопротивляемость к истиранию; стойкость против приваривания и обгорания при возникновении электрической дуги; стабильный фазовый состав и структурную однородность.

Естественной основой для разработки сплавов, удовлетворяющих этим требованиям, является техническая медь, экономно легированная малыми добавками различных элементов.

Электропроводность меди зависит от примесей и величины добавок к ней различных элементов (рис. 1) [1]. Наиболее сильно снижают электропроводность меди, фосфор, мышьяк, кремний, железо, селен, кобальт, а менее интенсивно – цирконий, кадмий, магний, олово, цинк, кальций.

Существенным недостатком меди является её низкая прочность, которую можно повысить различными способами: деформацией (степень деформации не менее 40 %); микролегированием элементами, мало снижающими электропроводность меди, но резко понижающими свою растворимость в α -твёрдом растворе при уменьшении температуры. Пересыщение твёрдого раствора закалкой от 850-900 °С и распад пересыщенного раствора при последующем низкотемпературном (400-500 °С) отжиге приводят к дисперсионному упрочнению меди на 60-80 %.

При сварке рабочая поверхность электродов нагревается до 400-700 °С, а температура начала рекристаллизации технической меди не превышает 200 °С, что неизбежно ведёт к рекристаллизационному разупрочнению материала электрода. Это обстоятельство также необходимо учитывать при выборе микролегирующих до-

Таблица 1. Характеристика некоторых электроконтактных материалов [2-3]

Изделия	Материал	Прочность, σ_p , МПа	Твёрдость, HV кГс/мм ²	Удельная электропровод- ность (% от Cu)	Температура разупрочнения, °С	Назначение
	Мц-4А 0,3-0,5 Cr 0,10-0,25 Mg	350-400	100-120	75	500	сварка Al и Mg-сплавов
	Мц-5Б 0,25-0,45Cr 0,20-0,35 Cd	450-480	120-130	90	450	сварка малоуглеродистых сталей
	Br X 0,4-1,0 Cr	450-500	130-140	80	520	углеродистые низколегированные стали
электроды	Мц-2 1,5-1,8 Ni 0,4-0,6 Si 0,15-0,30 Mg	500-550	140-170	50	540	нержавеющие стали
	Br X Цр А 0,3 Cr; 0,09 Zr	270-400	110-120	90	340	Al и Cu-сплавы
	Br БНТ-1,7 1,6-1,8 Be 0,05-0,15 Ti 0,12-0,40 Ni	600-900	140-170	50	500	тугоплавкие металлы и сплавы
	ВЖ-3П 71 Cu; 5 Fe; 2,3 Sn	–	80	20	–	пантограф; пробег 30,0 тыс. км
токосъёмники	медь – графит 67 Cu; 33 C	–	75	50	–	пантограф; пробег 40,0 тыс. км
	НМГ-1200 65 Cu; 33 C	–	90	85	–	пантограф; пробег 80,0 тыс. км
прокат	медь	220	50	100	150÷200	пробег 40,0 тыс. км

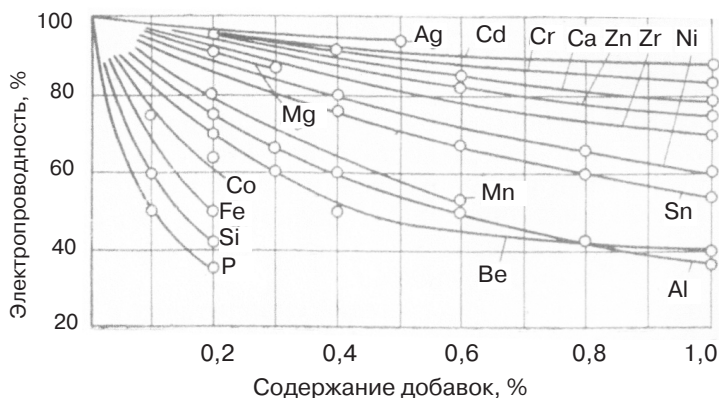


Рис. 1. Влияние примесей и легирующих элементов на электропроводность меди [1]

бавок. На рис. 2 отображено влияние различных элементов на температуру начала рекристаллизации меди при холодной деформации образцов на 40 % [4]. Следует учитывать, что при одновременном введении нескольких элементов влияние на процесс рекристаллизации окажет лишь один, наиболее активный. Повышенный нагрев материала требует также обеспечения определённого уровня его жаропрочности, что возможно при соблюдении некоторых условий [1]:

- ограниченная растворимость легирующих элементов в α -твёрдом растворе;
- высокая температура солидуса;
- высокая температура рекристаллизации;
- наличие дисперсных выделений тугоплавких фаз.

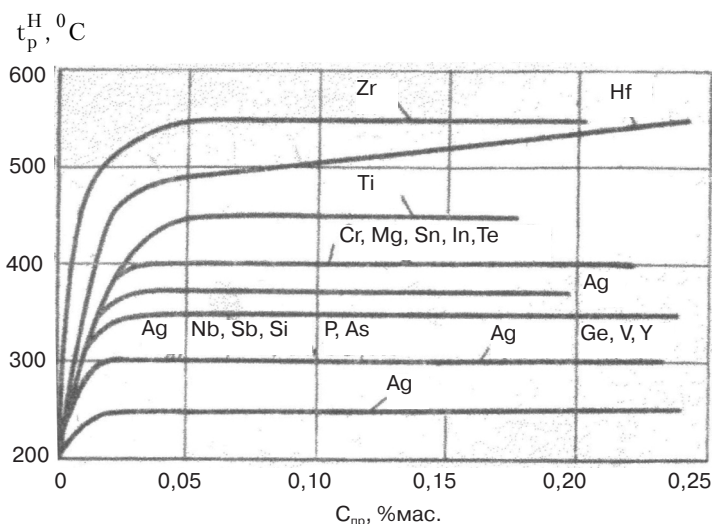


Рис. 2. Влияние примесей на температуру начала рекристаллизации меди [4]

Наилучшим сочетанием высокой электропроводности, прочности и твёрдости обладают сплавы меди, способные к дисперсионному упрочнению вследствие пере-сыщения α -твёрдого раствора ограниченно растворимым легирующим элементом. К таким сплавам можно отнести, прежде всего, хромовую бронзу (рис. 3), содержащую 0,1-1,0 % Cr [6] и циркониевую бронзу (рис. 4), содержащую 0,1-0,5 % Zr [5]. Упрочнение при старении хромовых бронз обеспечивают дисперсные выделения хрома, а при старении циркониевых бронз – фаза Cu_3Zr . Уровень свойств зависит

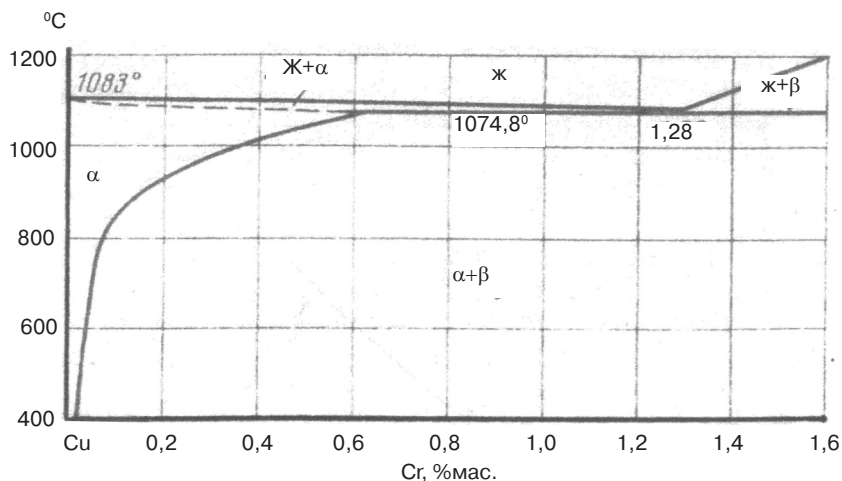


Рис. 3. Диаграмма состояния Cu-Cr [6]

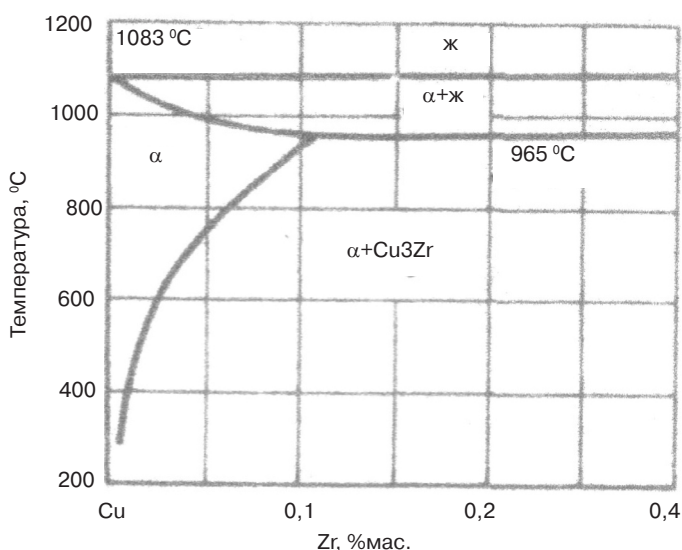


Рис. 4. Диаграмма состояния Cu-Zr [5]

от температуры и времени старения (рис. 5) [4]: с увеличением температуры время выдержки, необходимое для достижения максимальной твёрдости, уменьшается. Холодная деформация между закалкой и старением способствует дополнительному повышению прочности. Обращает на себя внимание также тот факт, что при отжиге хромовой бронзы существенно возрастает её электропроводность (рис. 6) [5].

Авторы [8] считают, что, в конечном счёте, стойкость электродов при контактной сварке определяется стабильностью размеров и равномерностью распределения выделений вторичной фазы.

Приведённый выше краткий обзор касается круга металлургических проблем и путей повышения эксплуатационного ресурса электроконтактных материалов. Но не менее важными являются технологические проблемы получения структурно-стабильных изделий из этих материалов.

Прежде всего, это касается выбора исходных шихтовых материалов; режимов их плавки; физико-химической подготовки расплава к разливке; создания условий затвердевания жидкого металла, обеспечивающих требуемый фазовый состав сплава и его структурную однородность.

Традиционно, для получения хромовых бронз используют лигатуру Cu – (2÷3) Cr, выплавка которой требует перегрева меди до 1600-1650 °С и связана с трудностями растворения в меди хрома и с его неравномерным распределением

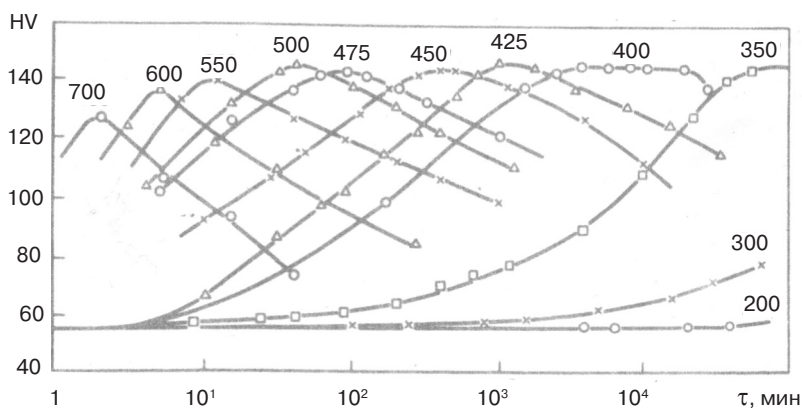


Рис. 5. Влияние времени старения при разных температурах на твердость сплава Si-0,6%Cr [7]

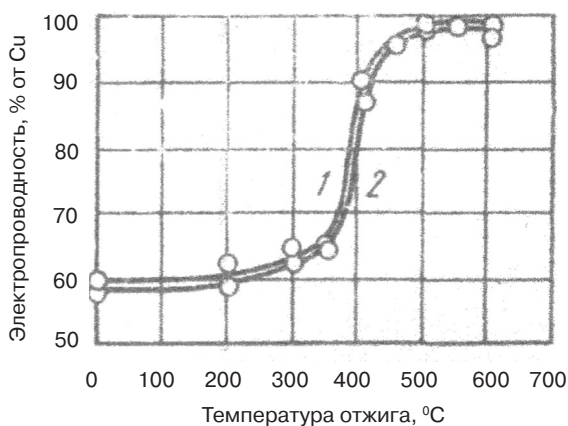


Рис. 6. Влияние температуры отжига на электропроводность хромовых бронз [5] 1 – 0,52 % Cr; 2 – 0,40 % Cr; 0,18 % Ag; продолжительность отжига – 2 часа

в объеме жидкого металла. Низкое содержание хрома в лигатуре требует её повышенного расхода в шихте, а попытки увеличения содержания хрома в лигатуре приводят к увеличению брака листовой лигатуры по размерам и количеству включений свободного хрома [9].

Плодотворной технологической идеей явилось предложение авторов [10-11] использовать в составе шихты для получения хромовой бронзы белый чугун, содержащий 14-16 % хрома. Это позволяет решить две важные задачи:

- легировать медь хромом с её последующим дисперсионным упрочнением;
- ввести в сплав мелкодисперсные тугоплавкие частицы карбидов хрома,

повышающие жаростойкость контактной поверхности электрода.

Опыт выплавки такой бронзы свидетельствует, что источником хрома для легирования меди являются обогащенный хромом аустенит и вторичные карбиды типа $(Fe,Cr)_3C$, а источником тугоплавких частиц – эвтектические карбиды типа $(Cr,Fe)_7C_3$. В табл. 2 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа опытных литых проб меди, легированной различными по массе добавками хромистого чугуна (16,3 Cr; 2,5 C; 1,07 Mn; 1,0 % Si).

Основной технологической сложностью является обеспечение равномерного распределения и седиментационной устойчивости тугоплавких частиц в расплаве, что возможно путём введения в жидкий металл поверхностно-активной (для межфазной поверхности карбид – расплав) добавки, а также путём интенсивного перемешивания микрогетерогенного расплава перед его заливкой в металлическую литейную форму. Задачей перемешивания является не только ускорение растворения хрома в меди и равномерное распределение карбидов хрома по объёму жидкого металла, но и уменьшение размеров гетерогенных частиц карбидов до величины заметно снижающей скорость их всплывания в плотной и жидкой дисперсионной среде.

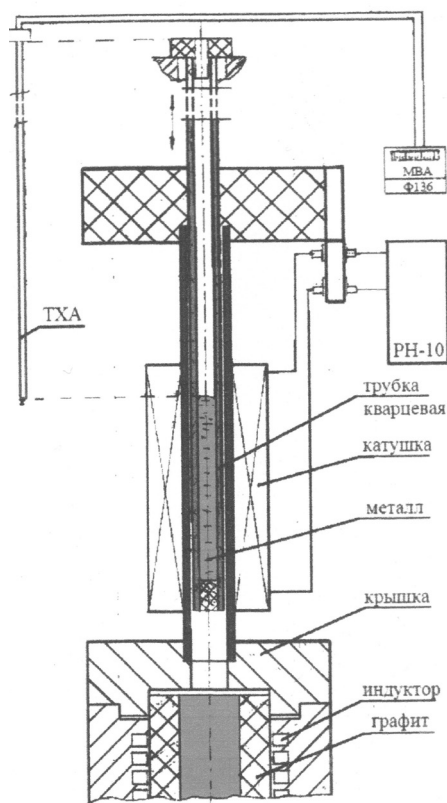
Управление перемешиванием жидкого металла при его выплавке в индукционной печи не представляет особых затруднений [12], если принять меры к соблюдению нужного соотношения высоты индуктора и высоты жидкого металла в тигле печи, а также избегать (в данном случае) использования жидких покровных флюсов. Вихри

Таблица 2. Результаты испытаний опытных проб

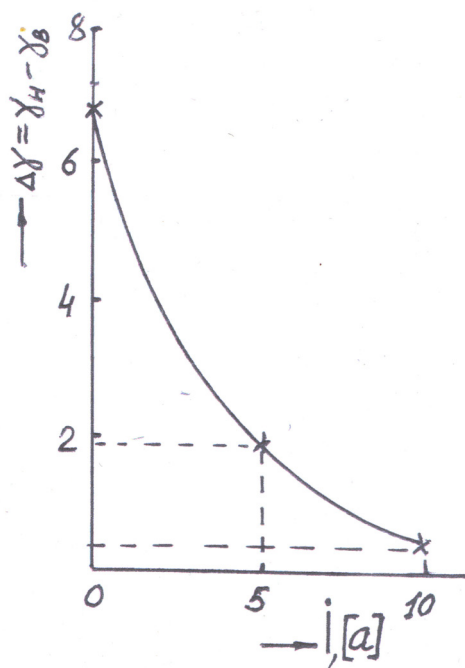
Номер плавки	Масса добавки чугуна, %	Содержание основных элементов, %мас.					Твёрдость, НВ	Электропроводность (% от Cu)
		Cu	Cr	Cr*	Fe	остальное		
1	0	99,93	0,01	–	0,05	0,01	68	98
2	2,0	99,46	0,03	–	0,50	0,01	87	45
3	4,0	98,52	0,22	15-20	1,27	0,01	95	38
4	6,0	97,62	0,36	15-20	1,01	0,01	120	32
5	8,0	96,76	0,34	15-20	2,87	0,03	125	28

*отдельные включения в матрице

и своеобразная циркуляция жидкого металла возникают при наличии неоднородности плотности вторичного вихревого тока в расплаве (или магнитного потока в индукторе), что всегда имеет место при питании катушек индуктора переменным током. Эксперименты по затвердеванию меди, легированной 6 %мас. добавкой хромистого чугуна, в электромагнитном поле катушки, питаемой переменным током (рис. 7), показали, что с увеличением силы тока в катушке (0 → 5 → 10 А) выравниваются показания электропроводности по высоте образца (рис. 7, б), а также более однородным становится распределение карбидов хрома в структуре опытных образцов (рис. 8).



а



б

Рис. 7. Затвердевание сплава Cu-6%-й добавки чугуна в электромагнитном поле: а – схема эксперимента; б – влияние силы тока в катушке на электропроводность верх и низ прутковой пробы

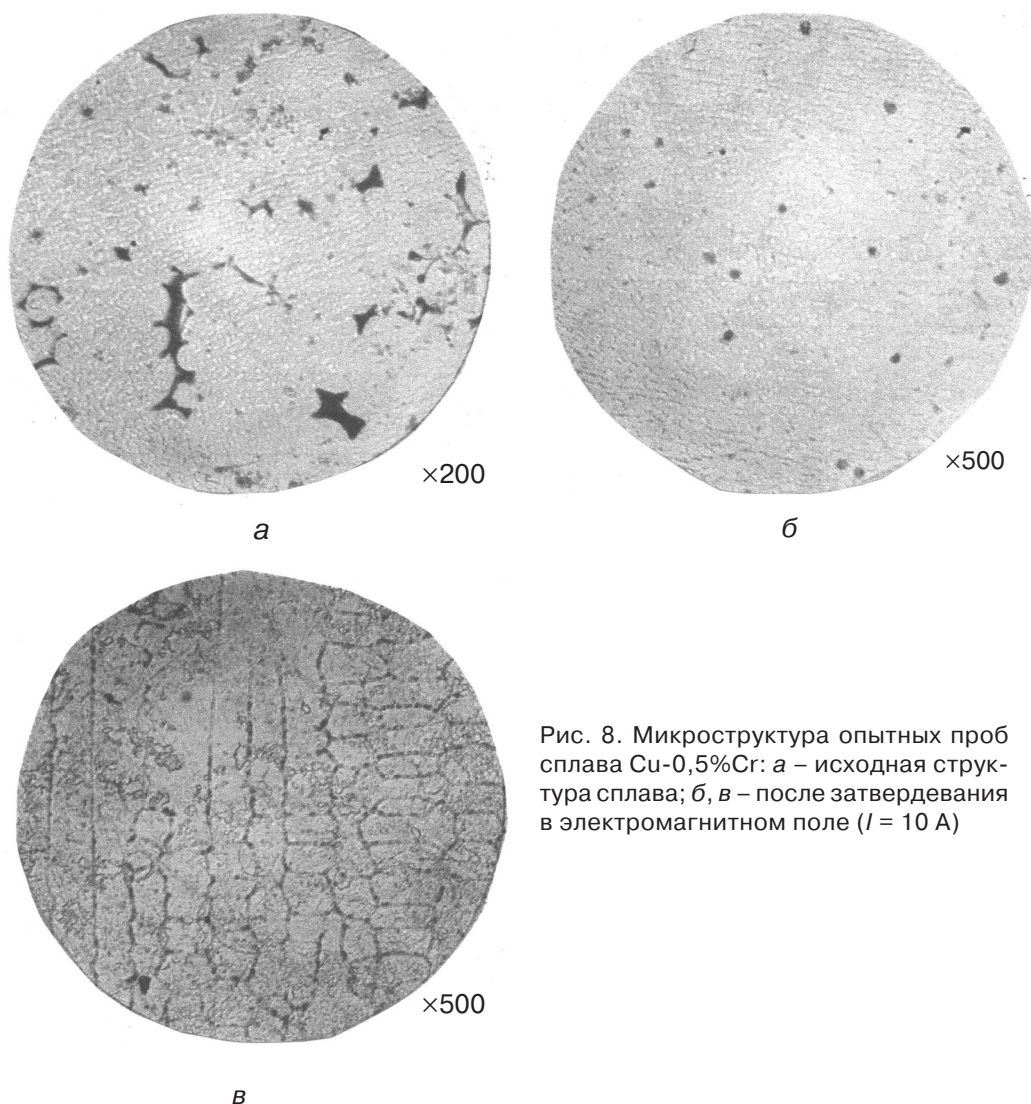


Рис. 8. Микроструктура опытных проб сплава Cu-0,5%Cr: а – исходная структура сплава; б, в – после затвердевания в электромагнитном поле ($I = 10$ А)

Исходные пробы металла отбирали с помощью кварцевых трубок ($d_{\text{вн}} = 3,0$ мм) из перегретой до 1300 °С меди, обработанной 6 %-й добавкой хромистого чугуна (16,3 Cr, 1,07 Mn, 2,5 C, 1,0 % Si). Пробы подвергали закалке в воде, отмечали верх заготовки, отрезали мерный образец длиной 60 мм и с помощью токовихревого преобразователя измеряли удельное электросопротивление верха и низа образца, помещая их поочерёдно до упора в нижний торец проходной катушки измерителя (длина катушки 40 мм).

Затем образцы ориентировано (верх-низ) вставляли в новые кварцевые трубки ($d_{\text{вн}} = 3,1 \div 3,2$ мм); нижнее отверстие трубки закрывали огнеупорной замазкой; сутки сушили и затем прокаливали в печи сопротивления, после чего трубку с образцом устанавливали в индуктор высокочастотной печи. Образец расплавляли и перегревали до 1300 °С, трубку с металлом (по направляющей кварцевой трубке) поднимали вверх до упора, обеспечивающего совмещение середины образца и середины катушки, после чего включали ток в катушке.

В единицах показаний токовихревого преобразователя (ТВП) удельная электропроводность литого образца меди ($d = 3,0$ мм) равна 46 ед., а меди с добавкой 6,0%-го чугуна – 33,0 ед. С учётом нелинейности измерительной характеристики

ТВП введение 6,0%-го чугуна приводит к снижению электропроводности меди на 40-50 %, что является следствием влияния железа, введённого с чугуном. Это отрицательное влияние может быть компенсировано повышением жаростойкости меди, легированной высокохромистым чугуном.

Сравнительные испытания электродов из сплава Cu-Fe, Cr-Cr₇C₃ и хромовой бронзы БрХ0,7 в условиях контактной сварки показали, что стойкость электродов из нового сплава возрастает в 2,5-3,0 раза.



Список литературы

1. Колачев Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – М.: Metallurgiya, 1972. – 480 с.
2. Электроды для контактной сварки. Конструкторское бюро онлайн. Режим доступа: <http://cb-online.ru>. Дата обращения 14.10.2015 г.
3. Композиционные накладки пантографов электровозов. Режим доступа: <http://www.re.dn.ua/text>. Дата обращения 10.02.2014 г.
4. Николаев А. К. Влияние примесей на температуру рекристаллизации меди / А. К. Николаев, И. Ф. Пружанин, В. М. Розенберг. – Цветные металлы, 1976. – № 2. – С. 75-76.
5. Смирягин А. П. *Промышленные цветные металлы и сплавы* / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белова. – Metallurgiya, 1974. – 488 с.
6. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. – М., Наука, 1979, 248 с.
7. Николаев А. К. *Хромовые бронзы* / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М.: Metallurgiya, 1983. – 177 с.
8. Агбальян С. Г. Сплавы для электродов контактной сварки / С. Г. Агбальян, Г. А. Висилиян, С. Г. Бояджан. – Сб. «Вестник ГИУА – Metallurgiya, материаловедение, недраиспользование» 2014, Вып. 17, № 2. – С. 365-386.
9. Плавка и литьё цветных металлов и сплавов. – М.: Труды Гипроцветметобработка. – 1969. – Вып. 32. – С. 105-112.
10. Кириевский Б. А. Формирование литой структуры в сплавах системы Cu-Fe-Cr-C, характеризующихся наличием двухфазной области жидкого состояния / Б. А. Кириевский, Л. Н. Трубаченко, В. В. Христенко // Процессы литья. – 2001. – № 2. – С. 84-88.
11. Кириевский Б. А. Новые дисперсно-упрочнённые бронзы и технология получения из них литых заготовок / Б. А. Кириевский, Л. Н. Трубаченко. // Процессы литья. – 2004. – № 4. – С. 61-65.
12. Остроумов Г. А. *Физико-математические основы магнитного перемешивания расплавов*. / Г. А. Остроумов. – М.: ГНТИЧМ, 1960. – 64 с.



References

1. Kolachev B. A., Livanov V. A., Yelagin V. I. (1972). *Metallovedeniie i termicheskaia obrabotka tsvetnyh metallov i splavov*. Moscow: Metallurgiiia, 480 p. [in Russian].
2. Elektrody dlia kontaktnoi svarki. Konstruktorskoie biuro onlain. Rezhim dostupa: <http://cb-online.ru>. Date 14.10.2015 [in Russian].
3. Kompozicionnye nakladki pantografov jelektrovozov. Rezhim dostupa: <http://www.re.dn.ua/text>. Date 10.02.2014 [in Russian].
4. Nikolaiev A. K., Pruzhanin I. F., Rozenberg V. M. (1976). Vliianie primesei na temperaturu rekristalizacii medi. *Tsvetnye metally*, № 2, pp. 75-76 [in Russian].
5. Smiriagin A. P., Smiriagina N. A., Belova A. V. (1974). *Promyshlennnye tsvetnye metally i splavy*. Moscow: Metallurgiiia, 488 p. [in Russian].

6. Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi. (1979). Moscow: Nauka, 248 p. [in Russian].
7. Nikolaiev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M. (1983). Hromovye bronzy. Moscow: Metallurgiiia, 177 p. [in Russian].
8. Agbalian S. G., Visilian G. A., Boiadzhan S. G. (2014). Splavy dlia elektrodov kontaktnoi svarki. Sb. «Vestnik GIUA – Metallurgiiia, materialovedeniie, nedraispol'zovaniie», is. 17, № 2, pp. 365-386 [in Russian].
9. Plavka i lit'e tsvetnykh metallov i splavov. (1969). Moscow: Trudy Giprocvetmetobrabotka, is. 32, pp. 105-112 [in Russian].
10. Kirievskii B. A., Trubachenko L. N., Hristenko V. V. (2001). Formirovaniie litoi struktury v splavakh sistemy Cu-Fe-Cr-C, harakterizuiushhihsia nalichiem dvukhfaznoi oblasti zhidkogo sostoianiia. Protsessy lit'ia, № 2, pp. 84-88 [in Russian].
11. Kirievskii B. A., Trubachenko L. N. (2004). Novye dispersno-uprochnennye bronzy i tehnologiia polucheniiia iz nikh litykh zagotovok. Protsessy lit'ia, № 4, pp. 61-65 [in Russian].
12. Ostroumov G. A. (1960). Fiziko-matematicheskie osnovy magnitnogo peremeshivaniia rasplavov. Moscow: GNTIChM, 64 p. [in Russian].

Поступила 10.03.2016