



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-115-122>
УДК 669.017

Поступила 12.11.2019
Received 12.11.2019

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДИСПЕРСНО–УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

Ф. Г. ЛОВШЕНКО, А. И. ХАБИБУЛЛИН, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь, пр-т Мира, 43.

Полученные в результате обработки в механореакторе композиционные материалы имеют структуру микрокристаллического типа с границами зерен, стабилизированными дисперсными частицами упрочняющих фаз размером менее 20 нм. Применение оксида азота N_2O в качестве технологической среды активизирует окислительно-восстановительные превращения, имеющие место в механически легированных композициях на основе системы $Cu-Al-CuO(MoO_3)$, что приводит к снижению концентрации алюминия в твердом растворе на основе меди и, как следствие, увеличивает электропроводность материала на 14 %, достигая значений 80 % от электропроводности меди. Разработанные механически легированные композиции и компактные материалы, полученные из них, отличаются высокой стойкостью против длительного термического воздействия при температурах, достигающих 0,85Тпл основы, что объясняется его структурой.

Ключевые слова. Механическое легирование, технология, дисперсно-упрочненная медь, электропроводность, структура, свойства.

Для цитирования. Ловшенко, Ф. И. Повышение электропроводности дисперсно-упрочненной меди / Ф. И. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // Литье и металлургия. 2019. № 4. С. 115–122. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-115-122>.

INCREASED ELECTRICAL CONDUCTIVITY DISPERSION –HARDENED COPPER

F.G. LOVSHENKO, A. I. KHABIBULIN, Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus, 43, Mira ave.

The material, obtained in reactor, is a composition, consisting of a copper matrix of microcrystalline type with the borders of grains, stabilized by disperse particles of strengthening phases in the size of less than 20 nanometers. It is established, that the application of oxide nitrogen N_2O as the technological environment at mix material processing in reactor activates the oxidation-reduction transformations, which take place in mechanically alloyed compositions on the basis of system $Cu-Al-CuO-MoO_3$, that leads to decrease in concentration of aluminium in a copper-based solid solution and, as a consequence, increases electrical conductivity of the material by 14 %, reaching values of 80 % from electrical conductivity of copper. It is shown, that the developed material is characterized by high stability against long thermal influence at the temperatures, reaching 0, 85 of temperatures of a basis fusion, which is explained by its structure.

Keywords. Mechanical alloying, technology, dispersion-hardened copper, electrical conductivity, structure, properties.

For citation. Lovshenko F.G., Khabibulin A. I. Increased electrical conductivity dispersion -hardened copper. Foundry production and metallurgy, 2019, no. 4, pp. 115–122. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-115-122>.

Введение

В настоящее время в Республике Беларусь стоит важная проблема создания конкурентоспособной продукции в различных отраслях промышленности, что возможно на основе создания ресурсосберегающих технологий и оборудования. Важное место в рациональном использовании материальных ресурсов отводится экономии цветных металлов, которая может быть достигнута путем значительного повышения стойкости быстроизнашиваемых деталей сварочного оборудования.

Прогресс в области получения новых электродных материалов связан с развитием порошковой металлургии. Электроконтактные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии, обладают более высокими механическими свойствами при повышенных температурах по сравнению с компактными металлургическими, имеющими тот же химический состав. Основной причиной повышения механических свойств является оксидная пленка на поверхности частиц порошка, которая затрудняет рекри-

сталлизацию подобно дисперсным включениям, препятствующим движению дислокаций и затрудняющим протекание процесса собирательной рекристаллизации.

В современных условиях для промышленности Беларуси актуален вопрос создания новых электротехнических материалов на основе меди, способных заменить дорогостоящие хромисто-циркониевые бронзы, применяемые для изготовления электроконтактных деталей сварочного оборудования, повысить основные эксплуатационные свойства этих изделий, качество сварных соединений и производительность процесса сварки. В связи с тем что спрос на указанную продукцию возрастает и соответственно увеличивается объем их потребления, поиск новых наиболее рациональных и эффективных технических решений указанных проблем является актуальной задачей.

Успешное решение данного вопроса обеспечит получение ряда электротехнических изделий типа сильноточных скользящих и разрывных электрических контактов из недефицитных материалов на основе меди с высокими характеристиками износо- и электроэрозионной стойкости, что позволит предложить пути решения проблемы повышения стойкости электрических контактов в целом.

В Белорусско-Российском университете была разработана теория и освоено производство механически легированной наноструктурной дисперсно-упрочненной меди. Компактированный материал представляет собой порошковую композицию, состоящую из медной матрицы, в которой равномерно распределено до 5 % по объему дисперсных частиц упрочняющей фазы [1–4]. В качестве последней применяются термодинамически стабильные соединения с высоким значением модуля сдвига, например, Al_2O_3 . Структура композиции характеризуется следующими параметрами: размер зерен основы – $\leq 0,5$ мкм, размер блоков – ≤ 50 нм. Основа представляет собой низкоконцентрированный твердый раствор алюминия в меди с содержанием легирующего элемента $\leq 0,1\%$. Границы зерен и субзерен стабилизированы включениями Al_2O_3 размером ≤ 20 нм. Указанная структура обеспечивает низкую скорость протекания рекристаллизационных процессов, высокие значения твердости и прочности не только при 20 °С, но и при температурах, достигающих 850 °С. При относительной электропроводности, равной 68–72 %, прутки из дисперсно-упрочненной меди обладают следующими механическими свойствами: твердость НВ 210–220, предел прочности при растяжении $\sigma_B = 860$ МПа, $\sigma_B^{500} = 400$ МПа, относительное удлинение – 5 %, температура рекристаллизации – 850 °С. Как следует из табл. 1, ранее разработанный материал в наибольшей мере отвечает требованиям, предъявляемым к электродным материалам и по комплексу физико-механических свойств превосходит лучший классический материал, применяемый для электроконтактных изделий, которым является бронза БрХЦр, а также внутренне окисленную медь и дисперсно-упрочненный композиционный материал производства Уралэлектромедь.

Таблица 1. Физико-механические свойства перспективных электродных материалов

Материал	НВ	σ_B , МПа	ρ , 10^{-8} Ом·м	HV ⁵⁰⁰ , МПа	σ_B^{500} , МПа	$t_{\text{рект}}$ °С
Внутренне окисленная медь	140	465	>2,11	46	235	700
ДУМ Уралэлектромедь	145	350	2,82	51	266	800
БрХЦр	170	500	2,07	40	280	500
ДУМ	220	860	2,45	70	400	850

Основные ожидаемые преимущества механически легированной ДУМ, предлагаемой в качестве материала для токоподводящих наконечников по сравнению с бронзой БрХЦр, могут заключаться в следующем: 1) высокие значения твердости и горячей твердости обуславливают снижение абразивного износа и вероятности «прихватывания» ТПН к электродной проволоке; 2) в процессе сварки рекристаллизация и разупрочнение материала на контактных поверхностях происходит при температурах, превышающих температуру рекристаллизации бронзы БрХЦр на 350 °С.

Методика исследования, материалы и оборудование

Технологический процесс получения токоподводящих наконечников включает в себя получение прутков из дисперсно-упрочненной меди, при необходимости горячую объемную штамповку, и, наконец, механическую обработку заготовок. Технологическая схема получения дисперсно-упрочненной меди, предназначенной для изготовления токоподводящих наконечников, обоснование которой изложено в [5], включает следующие стадии: выбор исходных компонентов и прогнозирование фазового состава материала; реакционное механическое легирование, приводящее к образованию дисперсно-упрочненной гранулирован-

ной композиции; холодное прессование брикетов и их термическая обработка; получение полуфабрикатов методом экструзии. Разрабатываемая технология основана на том, что упрочняющая фаза (Al_2O_3 , AlN) не вводится в шихту, а образуется на стадиях механического легирования и отжига гранулированной композиции в результате механически и термически активируемой реакции взаимодействия металла, имеющего высокое сродство к кислороду (Al), и кислородсодержащего компонента.

Перспективные термодинамически стабильные оксиды по критерию возрастания ΔG°_{298} их образования располагаются в следующем порядке: MgO , La_2O_3 , HfO_2 , UO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , GeO_2 , TiO_2 [6–9]. Они обладают микротвердостью $H_{0,49} > 2000$, что предполагает у них высокие значения модуля сдвига. В том же качестве могут быть использованы и нитриды AlN . В этом ряду ΔG°_{298} образования имеет значения от ~ -330 до ~ -290 кДж/моль-атом N [6–9]. В связи с химической инертностью молекулярного азота непосредственный синтез нитридов в процессе обработки композиции в воздушной среде маловероятен, но в среде N_2O это вполне возможно. При реакции алюминия с указанной газовой средой, в первую очередь, образуется Al_2O_3 , и частично AlN с образованием некоторого количества N_2 .

В табл. 2 приведены характеристики перспективных химических соединений, которые позволяют сделать вывод о возможности применения их в качестве упрочняющих фаз в ДУКМ на основе меди. Для получения жаропрочных дисперсно-упрочненных медных материалов по предлагаемой технологии исходная порошковая композиция, кроме медной матрицы, должна содержать металл, образующий термодинамически стабильное соединение, и химическое соединение – поставщик кислорода и азота. Прогнозирование фазового состава этих материалов может быть осуществлено на основе термодинамического анализа фазовых превращений. Кинетика протекания механически и термически активируемых превращений исследована на композициях, представляющих собой системы: «медь – элемент, имеющий высокое сродство к кислороду, – легирующий оксид», «медь – элемент, имеющий высокое сродство к азоту, – оксид азота», имеющих разную величину ΔG°_{298} взаимодействия между легирующими добавками.

Таблица 2. Характеристики перспективных оксидов и нитридов

Химическое соединение	Энергия Гиббса образования ($-\Delta G^\circ_{298}$), кДж/моль-атом (С, N, O)	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Микротвердость
Al_2O_3	527	2053	–
AlN	295	2350	1230

В качестве элемента с высоким сродством к кислороду и азоту взят алюминий. Поставщиками кислорода служили оксиды N_2O , CuO , MoO_3 , значение ΔG°_{298} образования которых (табл. 3) больше, чем у оксида легирующего элемента Al_2O_3 . Поставщиком азота являлся N_2O . В системах «матрица – элемент, имеющий высокое сродство к кислороду, – легирующий оксид» взаимодействие между легирующим металлом (Me) и легирующим оксидом ($\Xi_n O_m$) протекает по следующей реакции:

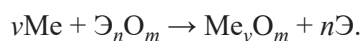


Таблица 3. Значение $-\Delta G^\circ_{298}$ образования легирующего оксида

Легирующий оксид	N_2O	CuO	MoO_3
$-\Delta G^\circ_{298}$ оксида, кДж/моль-атомов O	81	12	146

Продуктами взаимодействия должны быть оксид легирующего металла ($Me_\nu O_m$) и элемент, восстановленный из легирующего оксида (Ξ).

Для сохранения электропроводности матрицы элемент, восстановленный из оксида, должен обладать минимальной растворимостью в меди, в связи с чем перечень легирующих оксидов существенно сокращается. К этим элементам относятся N, Cu, Mo, Cr, V, Nb, Zr [6-9]. В работах [6-9] была изучена возможность применения Al_2O_3 в качестве упрочняющей фазы в различных композициях, в том числе и на основе меди. Исходя из равновесной термодинамики, химическое взаимодействие между исходными компонентами этой системы невозможно, и, следовательно, фазовые превращения отсутствуют. Анализ диаграммы «медь-молибден» показывает, что и в этой системе фазовые превращения отсутствуют.

Базовая композиция содержала 0,80 % Al и 0,71 % O, вводимого с оксидами [8]. При использовании оксидов CuO и MoO_3 в качестве кислородсодержащих компонентов их содержание в композиции составляло 2,5 и 0,8 % соответственно. При условии полного взаимодействия между легирующими компонента-

ми в процессе механического легирования должно образовываться 1,51 % Al_2O_3 . Но в действительности полноты протекания реакций не наблюдается и 0,10-0,15 % Al растворяется в матрице, образуя зоны Гинье-Престона, что приводит к снижению электропроводности до значений 60–70 % от электропроводности меди.

Для повышения электропроводности указанной композиции механическое легирование производили в газовой среде N_2O с избыточным давлением до 300 кПа с целью дополнительного окисления алюминия, не прореагировавшего с CuO и MoO_3 . При обработке шихты в среде N_2O ожидается образование дополнительных упрочняющих термодинамически устойчивых фаз Al_2O_3 и AlN, отличающихся повышенной дисперсностью.

В композицию входят порошок меди (основа композиции), 3,6 г MoO_3 (0,8 %), 3,6 г Al (0,8 %), N_2O , заполняющий свободный объем помольной камеры и некоторое рассчитываемое количество CuO. Общий объем помольной камеры – 1,0 л, объем, занимаемый шихтой и мелющими телами, – 0,37 л, масса шихты – 440 г. Количество N_2O , занимающего свободный объем, определяется из пропорции

$$\frac{22,4 \text{ л}}{44 \text{ г}} = \frac{0,63 \text{ л}}{x}, \quad (1)$$

откуда

$$x = \frac{44 \cdot 0,63}{22,4} = 1,24 \text{ г}. \quad (2)$$

Условием, необходимым для достижения максимальной электропроводности композиции, является полное связывание алюминия в оксиды и нитриды.

Количество алюминия, окисляемого оксидом молибдена, рассчитывается исходя из уравнения:



Из пропорции $\frac{144}{3,6} = \frac{48}{x}$ находят количество алюминия, связанного оксидом молибдена:

$$x = \frac{54 \cdot 3,6}{144} = 1,35 \text{ г}. \quad (4)$$

Таким образом, 3,6 г оксида молибдена связывают 1,35 г алюминия.

Количество алюминия, окисляемого оксидом азота, рассчитывается по уравнению:



Из пропорции $\frac{216}{x} = \frac{132}{1,24}$ находят количество алюминия, связанного оксидом азота:

$$x = \frac{216 \cdot 1,24}{132} = 2,03 \text{ г}. \quad (6)$$

Оставшееся количество алюминия, которое должно быть окислено оксидом меди, находится из разности:

$$3,6 - 1,35 - 2,03 = 0,22 \text{ г}. \quad (7)$$

Количество оксида меди, необходимое для окисления 0,22 г алюминия, определяется из уравнения:



Из пропорции $\frac{54}{0,22} = \frac{240}{x}$ находят количество оксида меди, необходимого для окисления оставшегося алюминия:

$$x = \frac{0,22 \cdot 240}{54} = 0,98 \text{ г}, \quad (9)$$

что составляет 0,22 % в составе композиции.

В качестве исходных компонентов для получения материалов использовали порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), алюминия ПА-4 (ГОСТ 6058-73), оксида меди с размером частиц 45–125 мкм. В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) применяли оксид молибдена (VI) MoO_3 с размером частиц 45–63 мкм. Составы исследованных композиций приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Исходные составы исследованных композиций

Номер композиции	Легирующие компоненты, %			Cu	Технологическая газовая среда
	Al	MoO ₃	CuO		
1	0,8	0,8	–	Остальное	N ₂ O, (60 кПа)
2	0,8	0,8	2,5	То же	Изолированная воздушная
3	0,8	–	2,5	То же	То же

Для проведения лабораторных исследований по отработке технологии использовали вибромельницу гирационного типа с четырьмя помольными камерами объемом 1 дм³ каждая. Радиус круговых колебаний, совершаемых помольными камерами, определялся съемными эксцентриками и составлял 5,0 мм. Размалывающими телами служили шары, изготовленные из стали ШХ15СГ твердостью HRC 62. Подачу газа заданного состава осуществляли через вентиль с золотником, установленными в крышке помольной камеры. Давление газа контролировали манометром избыточного давления (ГОСТ 2405-88) с верхним пределом измерения 0,4 МПа, класса точности 2,5 и регулировали его в пределах 0,01–0,4 МПа.

Брикетирование получаемой в механореакторе гранулированной композиции проводили в стаканах из медной фольги холодным прессованием до плотности 70–75 % от теоретической. Брикеты имели диаметр 64 мм.

Для завершения фазовых и структурных превращений, а также дегазации брикеты перед экструзией подвергали **отжигу**. Температура отжига изменялась в пределах 600–1050 °С при продолжительности обработки, равной 0,5–8 ч. В качестве атмосферы использовали водород, аргон и вакуум. Основная цель отжига – стабилизация структуры и свойств и дегазация.

Полуфабрикат в виде прутка получали **экструзией** брикетов, нагретых до температур 800 °С. С целью увеличения градиента скорости перемещения слоев материала, способствующего разрушению адсорбционных и оксидных пленок гранул, применяли плоскую матрицу ($\alpha = 90^\circ$).

Подогрев технологической оснастки до температур 450 °С производили в трубной печи электросопротивления. Коэффициент вытяжки – 19.

Удельное электросопротивление измеряли с помощью прибора «Константа К5» с применением датчика ФД2.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние продолжительности обработки шихты в механореакторе и дополнительного отжига полуфабриката в среде аргона на содержание оксида меди в композиции представлено на рис. 1.

Измерения электропроводности образцов показали, что для образца «2» она составляет 70 % от меди, образца «1» – 80, образца «3» – 65 %. Результаты измерений электропроводности образцов подтверждают гипотезу о том, что обработка композиции в среде N₂O приводит к снижению концентрации твердого раствора и повышению электропроводности.

Анализ изменения содержания оксида меди от продолжительности обработки позволяет предположить, что на первом этапе (от начала обработки до 3 ч) происходит окисление меди оксидом азота, а затем протекает процесс внутреннего окисления алюминия оксидом меди, что приводит к снижению содержания алюминия в твердом растворе на основе меди.

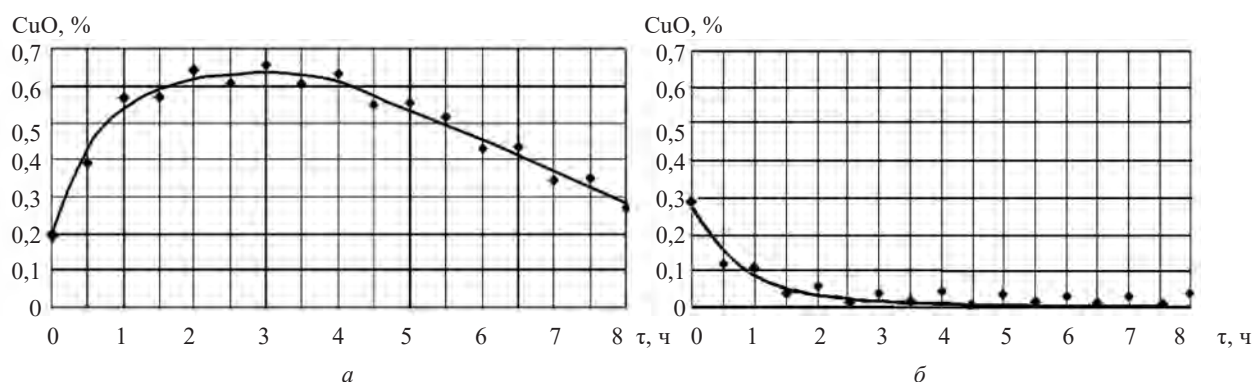


Рис. 1. Влияние продолжительности обработки шихты в механореакторе (а) и времени отжига в аргоне (б) на содержание оксида меди

Установлено, что при обработке шихты в атмосфере N₂O с избыточным давлением 60 кПа электропроводность материала по сравнению с результатами, полученными при обработке в изолированной воздушной среде, повысилась на 14 % (рис. 2).

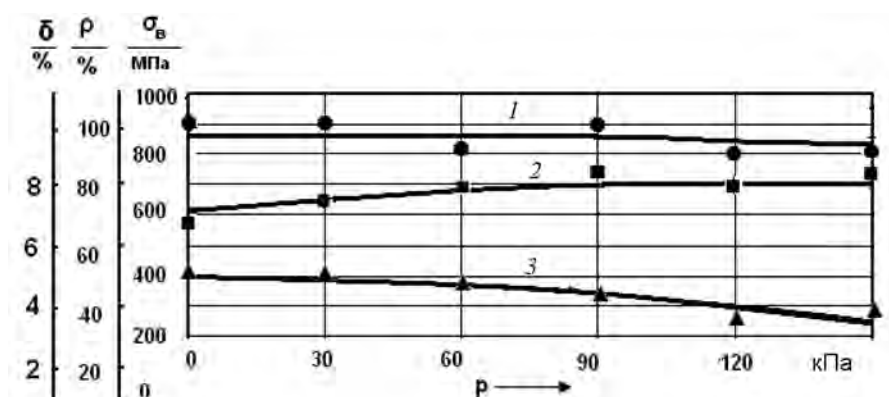


Рис. 2. Влияние избыточного давления оксида азота в помольной камере на свойства дисперсно-упрочненной медной композиции: 1 – предел прочности; 2 – относительная электропроводность; 3 – относительное удлинение

Физико-механические свойства дисперсно-упрочненной меди, полученной обработкой в механореакторе в среде оксида азота, следующие: относительная электропроводность – 80 %, твердость – НВ 220, предел прочности при растяжении $\sigma_B = 860$ МПа, $\sigma_B^{500} = 400$ МПа, относительное удлинение – 5 %, температура рекристаллизации – 850 °С.

Реакционное механическое легирование, осуществляемое в атмосфере оксида азота N₂O, активирует окислительно-восстановительные превращения, имеющие место в композициях на основе системы Cu–Al–MoO₃, что приводит к снижению концентрации алюминия в твердом растворе на основе меди и, как следствие, увеличивает электропроводность материала. Однако после завершения механического легирования термодинамическое равновесие системы не достигается и фазовый состав гранулированных композиций существенно отличается от равновесного. Было установлено, что дополнительная термическая обработка брикетированных гранулированных материалов, применяемая перед экструзией полуфабрикатов, повышает электропроводность композиционного материала, что свидетельствует об активизации фазовых превращений, приближающих систему к термодинамическому равновесию.

Термической обработке продолжительностью 30 мин (после выхода на установленную температуру) подвергали брикеты плотностью 70–75 %, полученные холодным прессованием. Результаты исследований влияния отжига на физико-механические свойства материала приведены в табл. 5.

После проведения отжига брикеты подвергали экструдированию с целью получения компактного материала, являющегося заготовкой для дальнейшей обработки давлением и резанием.

Таблица 5. Влияние температуры отжига брикетов на физико-механические свойства компактированного материала

Температура отжига, °С	Физико-механические свойства материала			
	твердость НВ	предел прочности, МПа	относительное удлинение, %	электропроводность, % от меди
600	230	848	3,8	74
700	226	856	4,4	76
750	220	858	4,7	78
800	216	860	5,0	80
800*	210	852	5,3	82
800**	205	848	5,8	84
850	198	780	5,4	83
900	180	742	5,2	84
950	156	605	4,8	85

* Продолжительность отжига 2 ч.

** Продолжительность отжига 4 ч.

Таким образом, для стабилизации фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиций обязательной операцией является отжиг, который может сочетаться с термомеханической обработкой. При этом имеют место развитие такие физико-химические процессы, как диффузия, рекристаллизация, растворение включений, выделение и рост новых фаз и др., способствующие переходу системы к равновесному или близкому к нему состоянию. Это обеспечивает стабильность структуры и свойств, которая является необходимым условием надежности и долговечности изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Измерения электропроводности показали, что у разработанного материала она составляет 80 % от электропроводности меди в отличие от прототипа 2, у которого не превышает значений 70%. Микроструктура разработанного материала имеет те же параметры, что и у прототипа, что обуславливает аналогичные механические свойства.

Результаты экспериментов позволили установить механизм фазовых превращений, происходящих в процессе реакционного механического легирования в среде оксида азота и последующего отжига в среде аргона: 1) растворение алюминия в медной основе; 2) окисление меди оксидом азота с образованием тонкой оксидной пленки на поверхности медной матрицы; 3) последующее внутреннее окисление алюминия, вызывающее образование наноразмерных включений оксидов и нитридов. Дисперсно-упрочненный медный композиционный материал имеет микрокристаллический тип структуры с размером зерен не более 0,2 мкм. Микроструктура разработанного материала показана на рис. 3.

Сравнительные производственные испытания, проведенные на ведущих промышленных предприятиях РБ и РФ (ОАО «Мотовело», Минский, Горьковский, Могилевский автозаводы, Брестский завод «Газоаппарат» и др.), показали, что стойкость наконечников, изготовленных из разработанного материала, превышает этот показатель у изделий, изготовленных из бронзы БрХЦр в 1,5–2,5 раза.

Выводы

1. Установлено, что к материалам, используемым для изготовления жаропрочных изделий электротехнического назначения, предъявляется сложный комплекс требований, который не может быть реализован в материалах, получаемых традиционными металлургическими способами. Проблема решается методами порошковой металлургии, открывающими перспективы создания дисперсно-упрочненного композиционного медного сплава электротехнического назначения с более высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. Одним из наиболее перспективных способов получения медных материалов является метод реакционного механического легирования, позволяющий получать композиции со структурой микрокристаллического типа.

2. Выявлено, что применение оксида азота N_2O вместо оксида меди CuO активирует окислительно-восстановительные превращения, имеющие место в механически легируемых композициях на основе системы $Cu-Al-MoO_3$, что приводит к снижению концентрации алюминия в твердом растворе на основе меди и, как следствие, увеличивает электропроводность материала на 14 %, достигая значений 80% от электропроводности меди ($\rho = 2,15 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

3. Предполагается, что применение дисперсно-упрочненной меди в качестве жаропрочного материала для токоподводящих деталей вместо бронзы БрХЦр должно привести к снижению:

абразивного износа и вероятности «прихватаывания» токоподводящих наконечников к электродной проволоке вследствие высоких значений твердости и горячей твердости (температура рекристаллизации ДУМ превышает температуру рекристаллизации бронзы БрХЦр на 350 °С);

отторжения частиц материала в твердом состоянии под воздействием термоударов в связи с высокими значениями горячей прочности;

количества переносимого в дуге материала благодаря измельчению зерна и торможению диффузионных процессов;

вероятности образования единой расплавленной области и эрозии разрывных и скользящих контактов в связи с распределением катодных пятен на большей поверхности (на границах раздела фаз);

эффекта прилипания брызг, ухудшению условий смачивания и сплавления с электродной проволокой;

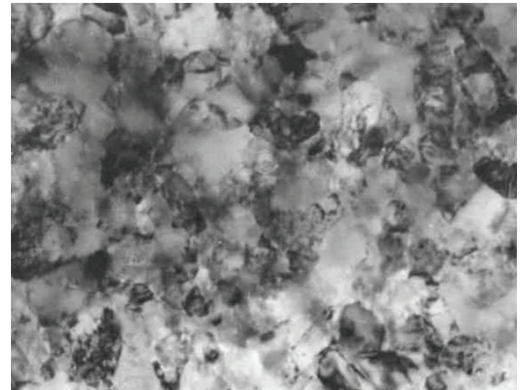


Рис. 3. Микрокристаллический тип структуры дисперсно-упрочненной меди. $\times 60\ 000$

контактного сопротивления благодаря наличию в структуре абразивных дисперсных частиц, обеспечивающих разрушение пленок на поверхности движущейся электродной проволоки.

4. Результаты производственных испытаний опытных партий изделий из ДУМ показали, что электроэрозионный износ токопроводящих наконечников снизился в 1,4 раза, а стойкость электродов для контактной точечной сварки возросла в 1,8–2,2 раза по сравнению с электродами, изготовленными из бронз БрХ и БрХЦр.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2005. 264 с.
2. **Витязь, П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. Минск: Беларуская навука, 1998. 352 с.
3. **Новые** ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф. Г. Ловшенко [и др.]. Гомель: Энергоатомиздат, 2004. 350 с.
4. **Наноконпозиционные** машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С. В. Авдейчик [и др.]; под ред. проф. В. А. Струка. Гродно: Гр ГУ, 2006. 403 с.
5. **Гнесин, Г. Г.** Спеченные материалы для электротехники и электроники: справ. изд. / Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
6. **Ловшенко, Ф. Г.** Теоретические и технологические основы создания механически легированных материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: матер. междунар. науч.-техн. конф. Могилев, 2000. С. 11–17.
7. **Ловшенко, Г. Ф.** Термодинамическое моделирование фазовых превращений при реакционном механическом легировании композиций на основе меди / Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Могилев. гос. техн. ун-та. 2006. № 1. С. 130–137.
8. **Ловшенко, Ф. Г.** Теория и технология получения композиционных жаропрочных наноструктурных механически легированных дисперсно-упрочненных материалов на основе металлов / Ф. Г. Ловшенко // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Физ.-техн. ин-т. 2006. С. 35–43.
9. **Ловшенко, Г. Ф.** Применение технологии реакционного механического легирования для создания высокостойких композиционных материалов для токоподводящих тяжело нагруженных деталей сварочного оборудования // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Физ.-техн. ин-т. 2006. С. 154–162.

REFERENCES

1. **Lovshenko G. F., Lovshenko F. G.** *Teoreticheskie i tehnologicheskie aspekty sozdaniya nanostrukturnyh mehanicheski legirovannykh materialov na osnove metallov* [Theoretical and technological aspects of creating nanostructured mechanically alloyed materials based on metals]. Mogilev, Belorussko-Rossiiskij universitet Publ., 2005, 264 p.
2. **Vitjaz' P. A., Lovshenko F. G., Lovshenko G. F.** *Mehanicheski legirovannye splavy na osnove aljuminija i medi* [Mechanically alloyed alloys based on aluminum and copper]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 1998, 352 p.
3. **Lovshenko F. G.** *Novye resursosberegajushhie tehnologii i kompozicionnye materialy* [New resource-saving technologies and composite materials]. Gorn'ye, Jenergoatomizdat Publ., 2004, 350 p.
4. **Avdejchik S. V.** *Nanokompozicionnye mashinostroitel'nye materialy: opyt razrabotki i primenenija* [Nanocomposite engineering materials: development and application experience]. Grodno, Gr GU Publ., 2006, 403 p.
5. **Gnesin G. G., Dubok V. A., Braterskaja G. N.** *Spechennye materialy dlja jelektrotehniki i jelektroniki: spravocnoe izdanie* [Sintered Materials for Electrical Engineering and Electronics: Reference Edition]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981, 344 p.
6. **Lovshenko F. G., Lovshenko G. F.** *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy sozdaniya mehanicheski legirovannykh materialov* [Theoretical and technological basis for the creation of mechanically alloyed materials]. *Novye konkurentno-sposobnye i progressivnye tehnologii, mashiny i mehanizmy v uslovijah sovremennogo rynka: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii* [New competitive and advanced technologies, machines and mechanisms in the conditions of the modern market: Materials of the international scientific and technical conference.]. Mogilev, 2000, pp. 11–17.
7. **Lovshenko G. F.** *Termodinamicheskoe modelirovanie fazovykh prevrashhenij pri reakcionnom mehanicheskom legirovanii kompozicij na osnove medi* [Thermodynamic modeling of phase transformations during reactive mechanical alloying of copper-based compositions]. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Bulletin of the Mogilev State Technical University*, 2006, no.1, pp. 130–137.
8. **Lovshenko, F. G.** *Teoriya i tehnologija poluchenija kompozicionnykh zharoprochnykh nanostrukturnyh mehanicheski legirovannykh dispersno-uprochnennykh materialov na osnove metallov* [Theory and technology for producing composite heat-resistant nanostructured mechanically alloyed dispersion-strengthened materials based on metals]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii* [Materials of the International scientific and technical conference.]. Minsk, FTI Publ., 2006, pp. 35–43.
9. **Lovshenko, G. F.** *Primenenie tehnologii reakcionnogo mehanicheskogo legirovanija dlja sozdaniya vysokostojkikh kompozicionnykh materialov dlja tokopodvodjashchih tjazhelonagruzhennykh detalej svarocnogo oborudovanija* [The use of reactive mechanical alloying technology to create highly resistant composite materials for current-carrying heavy-loaded parts of welding equipment]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii* [Materials of the International Scientific and Technical Conference.]. Minsk, FTI Publ., 2006, pp. 154–162.