

Р.Э. МОХНАЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПЕНСАЦИОННЫХ МЕДНЫХ И МЕДНОСТАЛЬНЫХ ТОКОПРОВОДОВ

В статье изложена технология изготовления токопроводов для систем питания кранов, железнодорожных транспортных средств, мощных ответственных электродвигателей и энергосистем. Показаны результаты исследований для медно-стальных образцов, в указанных системах происходят снижение потерь материалов, за счет увеличения прочности и долговечности изделий. Предложенная технология может быть использована для использования стале-медных проводов в системах компенсации потерь электроснабжения.

Ключевые слова: система подпитки, тролля, шина подпитки, наноприсадки, потери мощности и напряжения.

Р.Е. МОХНАЧ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КОМПЕНСАЦІЙНИХ МЕДНИХ І МІДНОСТАЛЬНИХ СТРУМОПРОВОДІВ

У статті викладена технологія виготовлення струмопроводів для систем живлення кранів, залізничних транспортних засобів, потужних відповідальних електродвигунів і енергосистем. Показані результати досліджень для мідно-сталевих зразків, в зазначених системах відбуваються зниження втрат матеріалів, за рахунок збільшення міцності і довговічності виробів. Запропонована технологія може бути використана для використання стале-мідних проводів в системах компенсації втрат електропостачання.

Ключові слова: система підживлення, тролля, шина живлення, наноприсадки, втрати потужності і напруги.

R.E. MOKHNACH

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF COMPENSATION COPPER AND COPPER STEEL CURRENT DUCTS

The article describes the technology of manufacturing conductors for power supply systems for cranes, railway vehicles, powerful critical electric motors and power systems. The results of studies for copper-steel samples are shown; in these systems there is a decrease in material losses due to an increase in the strength and durability of products. The proposed technology can be used to use steel-copper wires in power supply loss compensation systems.

Keywords: make-up system, trolley, make-up bus, nano-additives, power and voltage losses

Введение. В мировом производстве и потреблении электротехнических материалов наметилась и постоянно прослеживается устойчивая тенденция к увеличению доли применению комплексных, композиционных материалов. Это связано не только с тем, что природные запасы легирующих элементов, входящих в состав электротехнических материалов, таких, как вольфрам и медь, алюминий, весьма ограничены, но и с востребованностью новых конструкционных и технических свойств деталей электроаппаратов. Для целей техники на транспорте используют медные медно-стальные и алюмомедные компенсационные провода для электроснабжения мощных ответственных электродвигателей. Производство меди марки М0, используемой для таких проводников, очень энергозатратный и трудоемкий процесс. Следует учитывать и очень низкий коэффициент скольжения и прочности медных проводников. На современном этапе производства пути повышения качества и конкурентоспособности металлопродукции для электротехнических машин и механизмов на мировом рынке сводятся к совершенствованию существующих и разработке новых технологических схем производства. Реализация имеющихся способов экономии основных электротехнических элементов состоит в разработке мероприятий по уменьшению содержания последних в конечных изделиях без снижения эксплуатационных характеристик последних. При этом совершенствование эксплуатационных свойств материала осуществляют усложнением технологии его производства (ва-

кумный и электрошлаковый переплав, рациональное легирование; использование порошковых и композитных материалов; модифицирование и др.), а также различными вариантами термомеханической обработки. Считают, что такие меры, как нанесение покрытий и утилизация отходов, направленные на улучшение качества материалов, связаны с дополнительными энергетическими и материальными затратами и не обеспечивают существенной экономии легирующих и снижении себестоимости продукции.

Анализ процесса функционирования аппаратов и токопроводов транспортных средств свидетельствует о том, что в непосредственном взаимодействии с рабочей поверхностью детали находится только контактный (рабочий) слой. Поэтому, выделив в изделии рабочую зону, можно осуществить полную замену части инструмента другими материалами и, как более вероятным и близким по свойствам, металлами и сплавами. За счет рационального расположения слоев из армирующей середины (несущей основную механическую нагрузку) и рабочей поверхности (осуществляющую основную электрическую работу) может быть достигнуто значительное ресурсосбережение.

Однако обеспечение заданных конструктивных особенностей слоистых заготовок, предназначенных для изготовления, в значительной мере зависит от возможностей технологии их производства. При этом в надежности и работоспособности детали большое значение имеет возможность обеспечения прочной зоны контакта слоев или переходной зоны, определя-

© Р.Э. Мохнач, 2021

емых их составом, структурой и свойствами.

Актуальной является проблема повышения прочностных свойств медной матрицы без заметного снижения проводимости [4]. Большинство реализуемых на практике методов получения биметаллических литых слитков и заготовок, например, предусматривающие использование вставок, сварку слоев, а также применение промежуточных слоев, не могут гарантировать надежного соединения разнородных слоев [1, 5]. Поэтому разработка эффективной технологии получения биметаллического электротехнического материала представляет собой актуальную задачу. (Под термином «слоистые» или биметаллические подразумеваются материалы с соизмеримой толщиной слоев, получаемые преимущественно металлургическими технологиями.)

Целью работы является: разработка методов получения медного и сталемедного токопровода, используемого в троллеях для компенсации потерь в электропитании электродвигателей кранов, троллеях подачи электроснабжения в дуговых электропечах, для вставок в токосъемниках пантографов электропоездов. В последнее время большое распространение получило применение в таких компенсирующих троллеях применение биметаллического провода (сталемедного, медно-алюминиевого, с армирующей металлической вставкой и медной матрицей).

Основные исследования. Для целей токосъема на транспортных установках используют медные токопроводы и токосъемники с биметаллическими материалами (медносталевыми и алюмосталевыми проводниками, имеющими низкие триботехнические характеристики). Для передачи электроэнергии используют медносталевые и медные провода, свитые из нескольких тонких жил проводников. Изделия из меди обладают низкой износостойкостью, для повышения прочности используют медносталевые провода. Довольно остро стоит вопрос о повышении прочности, износостойкости и электропроводности такой проводниковой продукции. Проведя анализ существующих методов производства проводниковой продукции рассмотренной номенклатуры, пришли к выводу, что наиболее рациональным является метод дисперсионного упрочнения основного материала. Для этого, необходимо, чтобы в медной матрице фаза (упрочняющая, и инициирующая кристаллообразование) представляла собой сверхмелкозернистые и однородно рассеянные частицы, имеющие некогерентную границу раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием, неизбежно приводит к снижению проводимости меди. Более рационально введение в жидкую медь наночастиц и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы.

1.1 Для наночастиц необходимо учитывать падение температуры плавления мелких кристаллов в зависимости от их размера. Разница между температурой плавления маленького кристалла и нормальной (макроскопической) точкой плавления выражается уравнением Гиббса-Томсона.

$$\frac{(T_{\infty} - T_r)}{T_{\infty}} = \frac{\Delta T}{T_{ni}}$$

где T_{∞} – нормальная температура плавления; ΔT – разность между точкой плавления микро- и макрокристалла. T_r – температура плавления, при которой плавится кристалл с радиусом r .

Кристаллы твердого металла, близкие по размеру, с наночастицами способны растворяться в жидком металле за короткий промежуток времени. Следовательно, наночастицы металлов, температура плавления которых схожа с температурой плавления меди, неэффективны в качестве консолидирующей фазы. Некоторые неметаллические соединения, присутствуя в расплаве, способны придавать новые свойства матричному материалу. Примером такого соединения является нитрид бора [1, 2, 3]. На лабораторной установке были получены образцы круглого и фигурного сечения длиной до 20 м, а также заготовки круглого сечения из чистой меди. Предел прочности металлической матрицы изделий на 20% превышал аналогичный показатель марки МФ-85 медных образцов.

1.2 Необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. Идеальным условием явилось бы начало зарождения кристаллов металлической матрицы (меди) на введенных в расплав наночастицах.

Для армирующего основания существенное влияние на качество последнего оказывают поверхностные явления на границах разделения «жидкий металл – твердое тело». Надежность соединения матрицы и стальной арматурной вставки во многом определяется смачиванием жидкого металла твердого тела. Условия увлажнения: поверхностное натяжение на границе жидкости с твердым телом должно быть меньше поверхностного натяжения твердого тела с газовой фазой.

В то же время введение наночастиц не должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение плавления, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и стальной арматуры.

В таблице приведены результаты расчетов по формуле:

$$\sigma_T = \frac{Gb}{R},$$

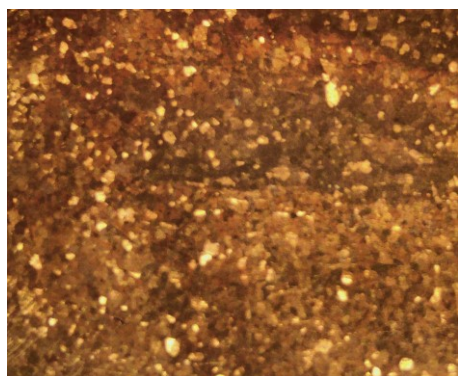
где G – модуль сдвига, для меди $G = 48000$ МПа; b – вектор Бюргерса, $b = 2,56 \times 10^{-9}$ м; R – расстояние между наночастицами, м.

Таблица – Влияние расстояния между наночастицами на предел текучести меди

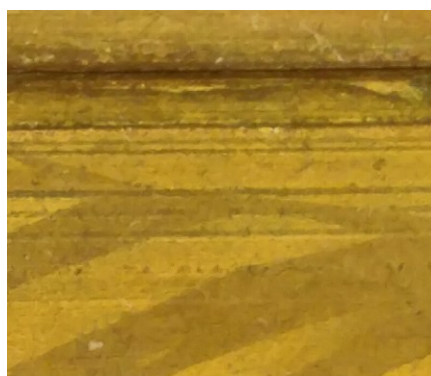
Расстояние между наночастицами, м	Увеличение предела текучести, МПа
10-2	0,0122
10-3	0,12288
10-4	1,2288
10-5	12,288
10-6	122,88
10-7	1228,8

По результатам расчетов сделан вывод о размерах, модифицирующих медную матрицу, и предположение о количестве такого модификатора.

Наиболее близким к меди, по температуре плавления, и некоторым другим физико-химическим свойствам (теплопроводность, электропроводность, одинаковый структурный тип и пространственная группа, близкие атомные радиусы) из приведенных металлов



а



б

Рис. 1. Структура модифицированного медного проводника:
а – модифицированная микроструктура ($\times 150$), б – макроструктура проводника в изделии ($\times 10$)

1.4 На электротехнические характеристики, оказывают немаловажные влияния следующие рассмотренные явления. Существенное влияние для армированных отливок на качество последних оказывают поверхностные явления на границах раздела «жидкий металл – твердое тело» [2, 3]. Надежное соединение медной матрицы и стальной армирующей вставки в значительной степени определяется смачиванием жидким расплавом твердого тела. Обычные условия смачивания таковы - поверхностное натяжение на границе жидкости с твердым телом должно быть меньше поверхностного натяжения твердого тела с газовой фазой. Условия равновесия на границе раздела трех фаз определяются следующим уравнением [6]:

$$\sigma_{T-G} = \sigma_{T-J} + \sigma_{J-G} \cos \theta$$

где θ – угол, образованный касательной к границе раздела «жидкость – газ» (ж – г) и границей раздела «твердое тело – жидкость» (т – ж) (краевой угол смачивания) [3].

Работа адгезии $A_{адг}$ определяется по уравнению:

$$A_{адг} = \sigma_{T-G} + \sigma_{J-G} - \sigma_{T-J}$$

или

$$A_{адг} = \sigma_{J-G} (1 - \cos \theta)$$

Работа поверхностного натяжения тем больше, чем меньше межфазное натяжение.

Растекание жидкости по поверхности твердого тела может быть выражено через работу адгезии и работу когезии. Условие растекания таково: работа адгезии должна быть больше работы когезии.

Растекание жидкости по поверхности твердого тела характеризуется коэффициентом растекания $K_{ж-т.раст.}$

$$K_{ж-т.раст.} = \sigma_{J-G} (\cos \theta - 1)$$

В свою очередь $\cos \theta$ является функцией поверхностного натяжения $\theta_{ж-г}$:

является серебро [6]. Логично предположить, что и значения Tr меди и серебра будут близкими. Однако исследования показали, что наиболее перспективными материалами могут стать наночастицы материалов температура плавления которых значительно превышает температуру плавления меди. Соединения, наночастицы которых, вводятся в расплав будут являться центрами кристаллизации.

$$\cos \theta = \frac{(\sigma_{T-G} - \sigma_{T-J})}{\sigma_{J-G}}$$

Из всех преобразований видно, что необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. Вместе с тем, введение наночастиц не должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение расплава, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и армирующей стальной вставки.

Изготовлены опытные образцы медно-стального композитного материала в индукционной печи, по центру индуктора размещали графитовый тигель, внутреннее сечение которого соответствовало сечению МФ-85 в масштабе 1:5. В донной части тигля закрепляли стальную армирующую вставку. Пространство между вставкой и стенками тигля заполнялось отрезками медной проволоки марки М0. При достижении температуры 1100°C медь расплавлялась и заполняла пространство между внутренней частью тигля и стальной армирующей вставкой. На сконструированной системе непрерывной вытяжки, по мере заполнения тигля производили формирование готового изделия. Расплавление медной шихты осуществлялось в условиях восстановительной атмосферы внутри тигля, учитывая высокую активность модифицирующей присадки бора. Расход модификатора просчитывали согласно расходу жидкого расплава на формирование конечной заготовки. В условиях высокой температуры жидкой меди (около 1200°C) в расплавленной меди возможна диффузия железа, что может повлиять на магнитную проницаемость металлической вставки. Полученная многослойная заготовка характеризуется высокой однородностью состава медной матрицы за счет формирования мелкодисперсной структуры по объёму заготовки.

Установка с графитовым водоохлаждаемым кристаллизатором показана на рис. 2.

В стенке металлоприёмника 1 устанавливают кристаллизатор, состоящий из водоохлаждаемой рубашки 2 и графитовых вкладышей 3, а при необходимости получения отверстия в отливке – стержень 4 с отверстиями 5 для прохода расплава. В начале процесса внутрь кристаллизатора вводят затравку-захват. Расплав, в разогретом металлоприемнике, заполняет водоохлаждаемый кристаллизатор, где начинает затвердевать в заготовку, наружный профиль которой соответствует геометрии кристаллизатора.

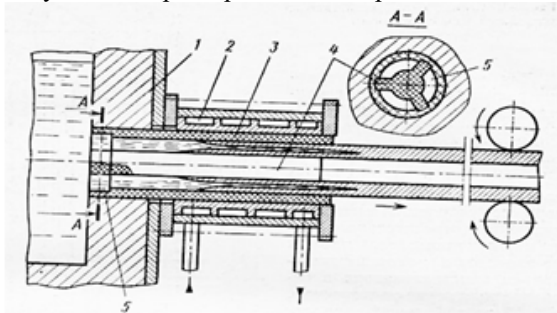


Рис. 2. Исполнительный узел кристаллизатора

Следующие технологии изготовления металлообрабатываемых проводников для штыревой электрической системы: совместная прокатка биметаллических заготовок и непрерывная разливка длинномерных композитных проводников конечной формы [1]. Обработка медной матрицы давлением снижает ее электропроводность из-за упрочнения поверхностного слоя, частый нагрев заготовки влияет на долговечность стальной арматурной вставки. Исходя из вышеизложенного, выбрали метод непрерывной разливки металла. Условия кристаллизации определялись математическим расчетом вставки матрицы из армированной стали и меди в медную изложницу с водяным охлаждением. Полученные данные использованы при разработке лабораторного кристаллизатора получения непрерывнолитого металлического матричного проводника.

Медносталльные композитные материалы сочетают в себе высокую проводимость, характерную для матрицы из чистой меди, с прочностью вставки из армирующей стали. Повышение прочностных характеристик таких материалов связано с увеличением сечения армирующей вставки. Поэтому оптимальный вариант – это комплексное повышение долговечности стальной вставки и медной матрицы. Нарушение такого условия приведет к снижению прочностных характеристик.

Выводы. Проведённый анализ физикохимических свойств прогнозируемого материала позволил выделить основные положения в технологии получения фактически нового электротехнического материала. Проведенные опытные плавки позволили получить дисперсионно упрочненный образец, полученный методом непрерывного литья, имеющий прочностные

свойства выше, чем обычный промышленный образец, что позволит апробировать применение такой медной проволоки и для троллей компенсации потерь для электрического питания приводов кранов. Разработан усовершенствованный метод получения медных композиционных токопроводов.

Список літератури:

1. Литейные технологии получения биметаллических слитков / Т. М.Титова, В. В.Лунев, Г. А.Бялик, С. И. Адамчук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. Спец. вып. № 7. С. 206-209.
2. Steel-copper nano composited materials /Tsyganov, V., Naumik, V., Byalik, H., Ivschenko, L., Mokhnach, R. // *MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019*, pp. 439-443. doi: https://doi.org/10.7449/2019mst/2019/mst_2019_439_443
3. Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems/Tsyganov, V., Ivschenko, L., Byalik, H., Mokhnach, R., Sakhniuk, N.// *MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019*, pp. 450-456.
4. Чекуров В. В., Крупеников С. А. Теплофизическая модель получения биметаллического инструмента // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 9. С. 126-129.
5. Формирование области соединения сплавов в литых металлических композициях / В. Кондратенко, В. Лейбензон, Т. Титова // *Third international congress "Mechanical engineering-technologies'01"*. Sofia, Bulgaria. 2001. P. 285-288.
6. К. Мейер. Физико-химическая кристаллография. М.: Металлургия, 1972. – 480 с.
7. Андриенко П.Д., Мохнач Р.Е. Мідні і сталемідні композиційні матеріали з високими електротехнічними властивостями. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2020, No 1, С. 47-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.1.10>

References (transliterated)

1. Liteynnye tekhnologii polucheniya bimetallicheskih slitkov / T. M.Titova, V. V.Lunev, G. A.Byalik, S. I. Adamchuk // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promysh-lennost'*. 2002. Spets. vyp. № 7. S. 206-209.
2. Steel-copper nano composited materials /Tsyganov, V., Naumik, V., Byalik, H., Ivschenko, L., Mokhnach, R. // *MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019*, pp. 439-443. doi: https://doi.org/10.7449/2019mst/2019/mst_2019_439_443
3. Creation of wearproof eutecticum composition materi-als for the details of the high temperature dynamic sys-tems/Tsyganov, V., Ivschenko, L., Byalik, H., Mokhnach, R., Sakhniuk, N.// *MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019*, pp. 450-456.
4. Chekurov V. V., Krupennikov S. A. Teplofizicheskaya model' polucheniya bimetallichesкого инструмента // *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1989. № 9. S. 126-129.
5. Formirovaniye oblasti soyedineniya splavov v litykh metallicheskih kompozitsiyakh / V. Kondratenko, V. Leybenzon, T. Titova // *Third international congress "Mechanical engineering-technologies'01"*. Sofia, Bulgaria. 2001. P. 285-288.
6. K. Meyyer. Fiziko-khimicheskaya kristallografiya. M.: Metallurgiya, 1972. – 480 s.
7. Andriyenko P.D., Mokhnach R.Ye. Mідні і сталемідні kompozitsiyni materialy z visokimi yelektrotekhnichnimi vlastivostyami. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPÍ». Seriya: Problemi udoskonalyuvannya yelektritchnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika, 2020, No 1, S. 47-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2020.1.10>

Поступила (received) 09.10.2021

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

Мохнач Річард Едуардович (Мохнач Ричард Эдуардович, Mokhnach Richard Eduardovich) – Національний університет «Запорізька Політехніка», завідувач лабораторії, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: etkmpk@gmail.com.