

УДК 621.763: 621.74.047

doi: 10.20998/2079-3944.2020.1.10

*Р.Э. МОХНАЧ, П.Д. АНДРИЕНКО***МЕДНЫЕ И СТАЛЕМЕДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Получены экспериментальные образцы сталемедного и медного композиционного проводника в том числе и из отходов меди по разработанной технологии. Исследованы физические и эксплуатационные свойства медного композиционного материала, особое внимание обращено на износостойкость, которую проверили в составе рабочего пантографа электрички, исследовали электропроводность полученного медного композита. Показано, что электропроводность композиционного материала из меди выше в области рабочих температур пантографа, а износостойкость значительно выше, чем у образца из стандартного медного материала.

**Ключевые слова:** наночастицы, стальная матрица, композиционный материал, структура.

*Р.Е. МОХНАЧ, П.Д. АНДРИЄНКО***МІДНІ І СТАЛЕМІДНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ З ВИСОКИМИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Отримано експериментальні зразки сталемідного і мідного композиційного провідника в тому числі і з відходів міді за розробленою технологією. Досліджено фізичні та експлуатаційні властивості мідного композиційного матеріалу, особливу увагу звернено на зносостійкість, яку перевірили в складі робочого пантографа електрички, досліджували електропровідність отриманого мідного композиту. Показано, що електропровідність композиційного матеріалу з міді вище в області робочих температур пантографа, а зносостійкість значно вище, ніж у зразка з стандартного мідного матеріалу.

**Ключові слова:** наночастиці, стальна матриця, композиційний матеріал, структура.

*R.E. MOKHNACH, P.D. ANDRIENKO***COPPER AND STEEL-COPPER COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH ELECTRICAL PROPERTIES**

Experimental samples of steel-copper and copper composite conductors, including those from copper waste, were obtained according to the developed technology. The physical and operational properties of the copper composite material were investigated, special attention was paid to the wear resistance, which was tested as part of the working pantograph of the electric train, and the electrical conductivity of the obtained copper composite was investigated. It is shown that the electrical conductivity of the composite material made of copper is higher in the range of operating temperatures of the pantograph, and the wear resistance is much higher than that of the sample made of standard copper material.

**Keywords:** nanoparticles, steel matrix, composite material, structure.

**Введение** Расширение сети железных дорог и увеличение скорости движения локомотивов обуславливает актуальность разработки технологий производства и ремонта медных и сталемедных заготовок для производства, как проводов, так и ремонтной базы для производства и восстановления пантографов, предназначенных для высокоскоростных железнодорожных магистралей. Условие отсутствия собственных ископаемых для производства меди на Украине, дефиците и постоянно растущей цене на нее на мировом рынке остро актуальность имеет производство медной продукции из вторичных медных отходов. Одним из вариантов решения этой проблемы увеличения объема производства высокопрочных медных заготовок, по размерам, близким к размерам готовых изделий, может быть решена при получении в процессе непрерывной или полунепрерывной разливки меди. С целью повышения конструктивной прочности, без потери высокого уровня электропроводности, целесообразно не только армировать медь стальной проволокой-вставкой, но и получать медную матрицу

с улучшенными параметрами. Отработка параметров технологии получения медных и сталемедных непрерывнолитых заготовок в реальных условиях производства связана с большими материальными и финансовыми затратами, поэтому использование математического и физического моделирования является наиболее эффективным. Анализ публикаций по математическому моделированию процесса формирования непрерывнолитой, как и полунепрерывнолитой медной заготовки свидетельствует об их разнородности и немногочисленности, а наличия моделей описания процесса затвердевания сталемедной заготовки, получаемой в процессе взаимодействия расплава меди со стальной вставкой не выявлено. Приведем обнаруженный ряд существующих сведений и созданных математических моделей. В работе [1] приводятся сведения относительно получения крупных промышленных слитков меди с учетом гидродинамики движения расплава, в условиях формирования маломерных заготовок, они не применимы. Работы Ф. В. Недопекина [2], по

© Мохнач Р.Э., Андриенко П.Д., 2020

моделированию процесса формирования стального слитка с армирующей вставкой также относится к крупным промышленным слиткам. Математическая модель теплофизических процессов [3], при затвердевании сталемедного композита, разработанная авторами работы, касается принципиального иного процесса – взаимодействия большого числа стальных гранул с медным расплавом. Следует отметить исследования и математическое моделирование [4, 5], тепловых особенностей процесса формирования проволочных заготовок из драгоценных сплавов при непрерывном литье в графитовый кристаллизатор. Разработанная ими модель относится к процессу циклического вытягивания заготовки на установке, отличающейся как конструктивно, так и небольшими размерами. Сложность описания [6] процесса затвердевания меди в кристаллизаторе состоит в неопределенности коэффициента затвердевания в математическом выражении этого закона, а также заметного влияния на него перегрева над температурой ликвидуса.

Цель работы – исследование композиционного электротехнического материала с улучшенными эксплуатационными характеристиками, предъявляемыми для применения в области контактных сетей и токосъемников подвижного состава железных дорог.

**Постановка задачи.** Медь как электропроводный материал широко применяется в электротехнике и радиоэлектронике. Однако существенным недостатком меди как конструкционного материала является небольшая механическая прочность. Для электротехнических материалов существенным оказываются и негативные показатели трения меди по меди. Наиболее эффективным методом упрочнения меди является легирование некоторыми элементами, однако даже незначительное содержание последних существенно снижает электропроводность меди. Поэтому перспективным является разработка на основе меди металломатричных композитных материалов из лома меди, сочетающих высокую электропроводность медной матрицы с повышенной механической прочностью и улучшенными свойствами по отношению к истиранию. Такие материалы должны иметь высокопрочный армирующий каркас, размещенный внутри металлической матрицы из высокоэлектропроводной меди.

**Результаты исследования.** Радиус стальной армирующей вставки оказывает существенное влияние на кинетику кристаллизации медной матрицы и время полной ее кристаллизации [7]. Определено рациональное сочетание диаметра стального провода и зависимость времени полной кристаллизации медной матрицы армированной металломатричной сталемедной заготовки в зависимости от радиуса стальной вставки. Повышение прочностных характеристик таких материалов связано с увеличением сечения стальной арматуры [7]. В результате исследований определяли зависимость времени полной кристаллизации медной

матрицы. Определили рациональное сечение диаметров стального провода и медной матрицы. Актуальной является проблема повышения прочностных свойств медной матрицы без заметного снижения электропроводности. В работах [13,14] были получены результаты, которые легли в основу разработанной опытной установки медных и сталемедных материалов. Установка состоит из индукционной печи, кристаллизатора, механизма непрерывной подачи и вытяжки, водоохлаждаемого кристаллизатора, и позволяет получить материал с радиусом стальной вставки до 0,15 см, с радиусом медной матрицы до 0,4 см. Конечный диаметр сталемедной заготовки составляет до 1,1 см.

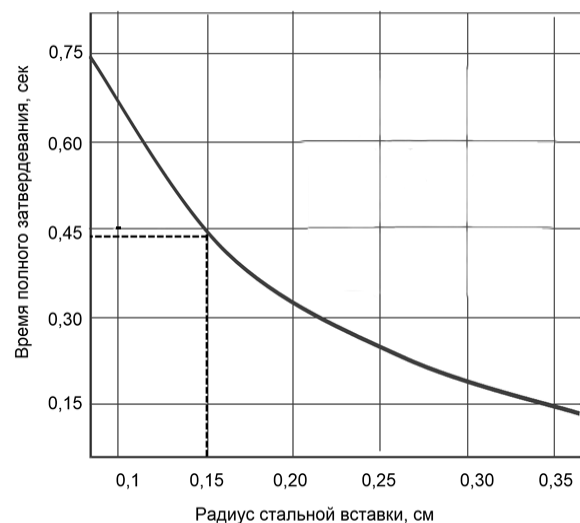


Рис. 1. Зависимость времени полного затвердевания сталемедной заготовки от радиуса стальной армирующей вставки.

Указанная зависимость аппроксимирована формулой:

$$y = 0,036 \times x^{-0,56}, r = 0,929 \quad (1)$$

Определяли зависимости полного времени затвердевания заготовки. Принципиально эта задача может быть решена применением дисперсионного упрочнения. Необходимо, чтобы в медной матрице образовалась вторая фаза в виде очень мелких и однородно распределенных частиц, имеющих некогерентную поверхность раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием [10, 11], неизбежно приводит к снижению электропроводности меди. Более рациональным является введение в расплавленную медь частиц и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы. Увеличение предела текучести меди при упрочнении ее частицами можно рассчитать по методике, приведенной в работе [8].

Определение краевого угла смачивания расплавом меди корундовой подложки. Необходимым условием равномерного распределения частиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву. Вместе с тем, введение частиц не

должно увеличивать краевой угол смачивания и поверхностное натяжение расплава, так как в этом случае нарушается прочность соединения медной матрицы и армирующей стальной вставки. Расплавы модифицировали комплексным составом с частицами меди, алюминия, карбидом кремния, карбонитридами титана. Величина краевого угла смачивания характеризует насколько применяемый материал будет взаимодействовать с матричным расплавом на физико-химическом и термическом уровнях [9]. Провели эксперимент по определению краевого угла смачивания [Θ] расплавом меди корундовой подложки. После чего расплав модифицировали наночастицами меди, алюминия, карбидом кремния, карбонитридами титана и бора. Результаты определения краевого угла смачивания приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Краевой угол смачивания расплавом меди подложки из корунда (метод лежащей капли)

Модификатор	Без модификатора	Карбонитрид титана	Карбонитрид бора	Медь	Алюминий	Карбид кремния
Θ, град.	134,5	83	90	128	107	84,5

Модифицирование наночастицами меди заметного влияния на краевой угол смачивания не оказало. Модифицирование алюминием снизило краевой угол смачивания. В наибольшей степени снизили краевой угол смачивания наночастицы карбонитрида титана, бора и карбида кремния. Изменение одного свойства системы неизбежно влечет изменение остальных физических свойств. Микрофотографии чистой медной «матрицы» и армированного медного композита, из вторичных материалов представлены на рисунке 3, увеличение 200. 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 составляющей.

Расчетная скорость образования кристаллов меди, для опытного материала составила 1,33 ед/(см<sup>3</sup>·с), что позволяет определить зарождение кристаллов в расплаве происходит по гомогенному механизму.

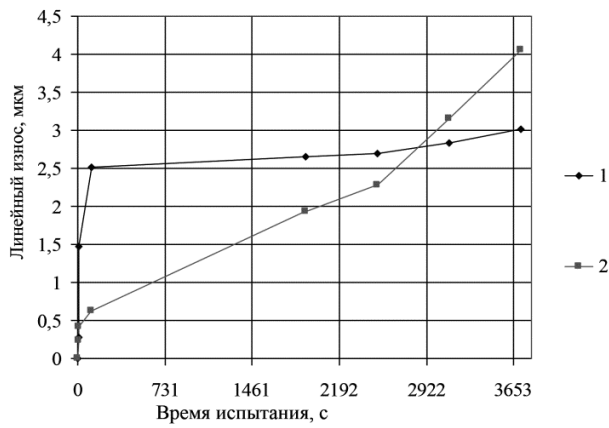
**Проверка на износостойкость.** Электрический износ, по отношению к механическому играет не существенную роль [16]. Проверяли износостойкость методом нанесения меток микротвердости. Устройство изготовлено на базе настольного сверлильного станка SPD-13. Электродвигатель, мощностью 350 Вт через клиноременную передачу вращает шпиндель, на конце которого находится трехлапчатый самоцентрирующий сверлильный патрон. В патроне закреплен вал, с плоским шлифованным диском, изготовленным из твердого сплава ВК-100. Нижний конец вала опирается на радиально-упорный шарикоподшипник, установленный в отверстии рабочего стола станка. На

рабочем столе закреплена стойка, с кронштейном, с нагружающим приспособлением.

Нагружающее приспособление состоит из направляющей втулки, в которой перемещается шток. На верхнем конце штока закреплен держатель груза, с грузом. Масса груза через этот шток, передается непосредственно на держатель образца. Образец, (в данном случае в виде плоской пластинки размером 8×10×1,5 мм) был закреплен пайкой на шестигранной головке. Последняя входит в шестигранное отверстие держателя образца. Наличие зазора порядка 0,3 мм между ними обеспечивает самоустановку образца относительно плоскости диска. Скорость вращения диска составляла до 98 км/час, с усилием до 40Н. Анализ износостойкости экспериментального литого материала и традиционно используемой заготовки представлен на рисунке 2. На литом образце, в начальный период притирки контактирующих частей износ происходит значительно быстрее. Затем проявились ожидаемые антифрикционные свойства, и износ переходил в стабильную фазу и не имел стремительного экстремума. На образце из меди марки М0 этап притирки с быстрым износом четко не проявлялся, но износ происходил более интенсивно, и после 3000 секунд испытания носил уже катастрофически интенсивный характер. Исследования под микроскопом обнаружили вырывы частиц материала [13, 14].

Испытания на электропоезде EP2, у которого в составе пантографа была включена медная композиционная вставка, показали снижение износа материала, по сравнению со штатным в 1,4 раза.

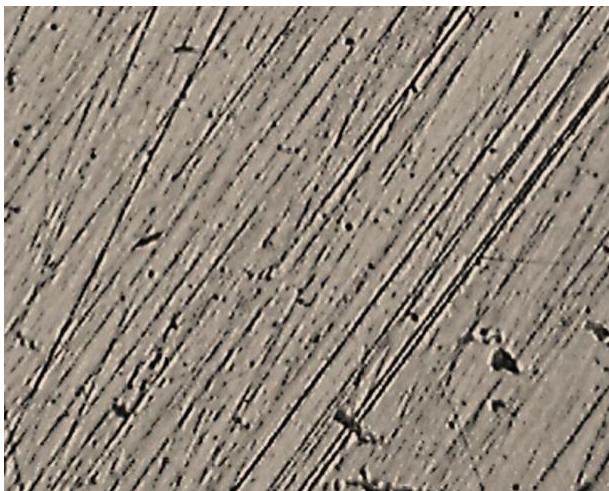
**Исследование электропроводности.** В процессе исследований армированного медного материала особое внимание уделяли электротехническим свойствам, таким, как электропроводность, при рабочей температуре 100°C так и выше. Поставленная задача снижения удельного сопротивления, или повышения электропроводности имеет решение при выполнении некоторых условий. Многие материалы проявляют фундаментально другие физические свойства, которые становятся очевидными только на уровне нанометрических размеров (менее 100 нанометров) [10, 11]. Необходимо, чтобы в медной матрице образовалась вторая фаза в виде очень мелких и однородно распределенных частиц, имеющих некогерентную поверхность раздела с матрицей. Образование частиц второй фазы путем легирования меди некоторыми элементами, например, бериллием, неизбежно приводит к снижению электропроводности меди. Более рациональным является введение в расплавленную медь наночастиц карбонитрида бора, не оказывающих влияние на электропроводность и обеспечение их равномерного распределения по сечению матрицы.



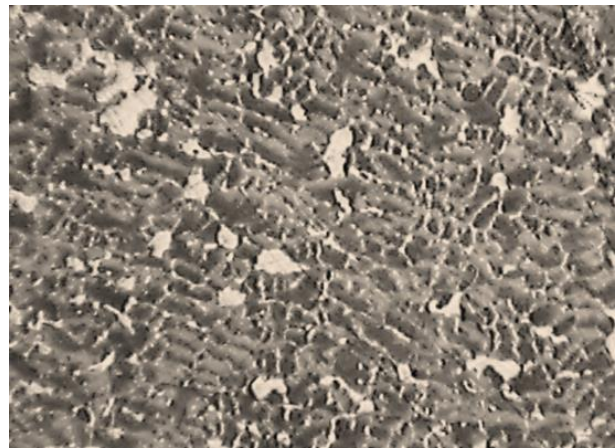
1 – непрерывнолитой образец, ориентированный структурой вдоль направления износа; 2 – деформированный образец

Рис. 2. Сравнительный анализ износостойкости деформированной и непрерывнолитой заготовки.

Для армированных отливок существенное влияние на качество последних оказывают поверхностные явления на границах раздела «жидкий металл – твердое тело». Надежное соединение матрицы и стальной армирующей вставки в значительной степени определяется смачиванием жидким металлом твердого тела. Необходимым условием равномерного распределения наночастиц в расплаве является минимальная взаимная адгезия и большая адгезия к расплаву.



а



б

а – микроструктура медной матрицы, б – микроструктура полученного композиционного материала

Рис. 3. изменение структуры исследуемого материала

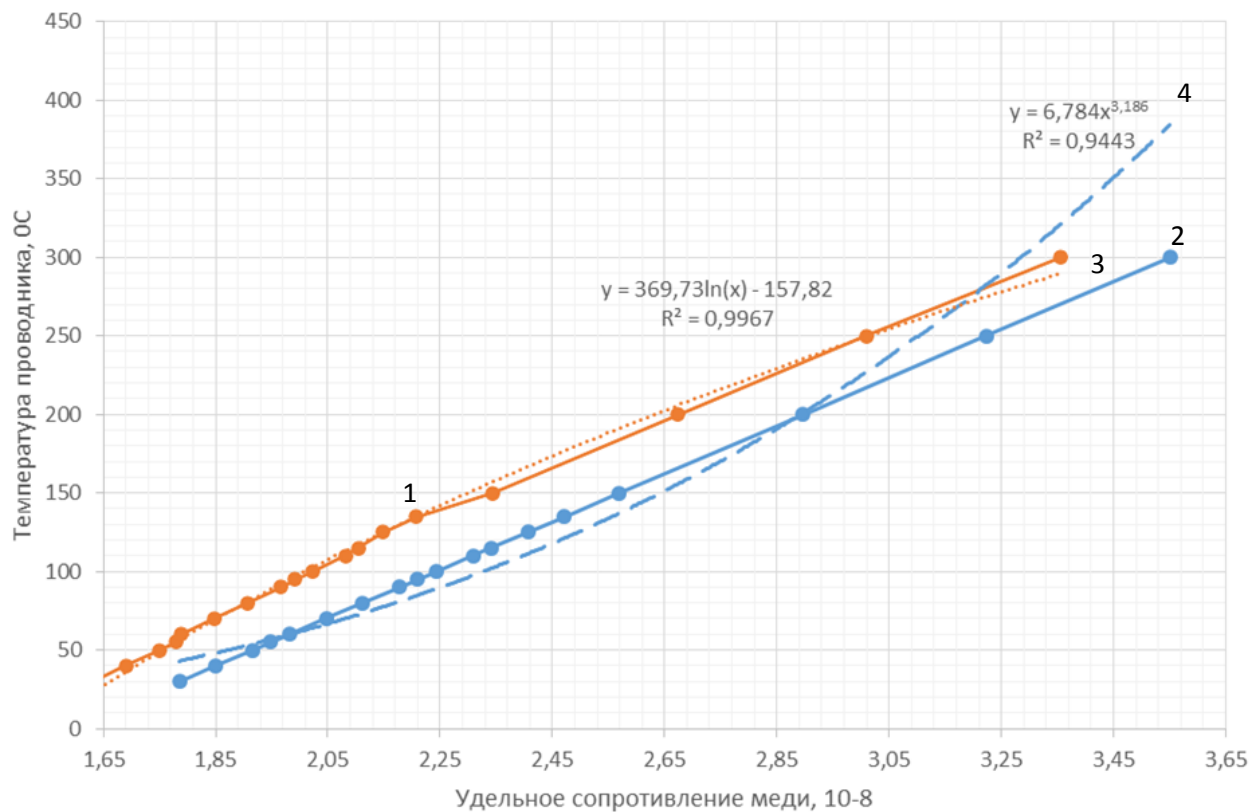
Электрический импеданс медного материала зависит от нескольких факторов:

- удельного сопротивления;
- внешней температуры.

Наиболее заметное изменение импеданса медного композиционного материала происходит при температуре более 50°C, проводимость выше, чем у стандартных образцов медного провода марки М0. Но и до этой температуры получены положительные результаты. В работах [10] показана возможность anomalous увеличения электропроводности при повышении температуры в 200 раз при нагреве образца до 100 °С. В свою очередь [11] показано что спеченные порошки проводят лучше, чем монокристаллы. Возможна смешанная проводимость, наряду с электронной, существует и ионная (работы Тубандта) около 200°C – 20% от общей проводимости системы.

Результаты испытаний измерений удельного сопротивления на образцах медного композиционного материала отображены на рис. 4.

В сталемедном проводе необходимо обращать внимание на выбор марки металла с точки зрения снижения добавочных потерь от высших гармоник, которые присутствуют в контактной сети, желательно выбирать материалы соответствующей прочностью с малой магнитной проницаемостью [12, 15].



1 – данные эксперимента, 2 – справочные и расчетные данные, 3 – линия тренда эксперимента, 4 – линия тренда, для справочных и расчетных данных

Рис. 4. Теоретическое (нижняя линия) и экспериментальное (верхняя линия) удельные сопротивления

В полученном материале измеренная величина в диапазоне до 100°C имеет стойкую отличительную особенность, удельное сопротивление исследуемого материала ниже, а, следовательно, и электрические потери меньше в среднем на 10%. Линия (2) данные для чистого медного проводника – (4) линия тренда, со статистической формулой, построенная по табличным данным, а верхняя линия (1) данные по результатам эксперимента – (3) линия тренда рассчитанная по экспериментальным данным для исследуемого композиционного материала. Каждая точка на линии соответствует усреднению по пяти опытам исследования на трех образцах.

Зависимость удельного сопротивления от температуры, для чистой меди, аппроксимируется зависимостью (кривая 2):

$$y = 6,784 \times x^{3,186}, R^2 = 0,9443 \quad (2)$$

Зависимость удельного сопротивления от температуры, для композиционного материала, аппроксимируется зависимостью (кривая 1):

$$y = 369,73 \ln x^{-157,82}, R^2 = 0,9967 \quad (3)$$

**Выводы.** Показана возможность получения композиционного медного проводника из вторичных материалов меди, сочетающих оптимально высокую электропроводность медной матрицы с повышенной механической прочностью и с повышенной износостойкостью, также возможно получение композиционного медного проводника с армирующей стальной вставкой.

#### Список литературы

- 1 Смирнов А. Особенности полунепрерывной розливки медных заготовок и оптимизация режимов осциляции кристаллизатора / А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз, Ю.Д. Савенков // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – Випуск 11 (159). – С.145–153.
- 2 Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при формировании композиционных слитков / Ф.В. Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов // Технічна фізика та промислова теплоенергетика – 2009. – вип.1. – С.149–158.
- 3 Затуловский А.С. Теплофизика и кинетика формирования макронеоднородного литого композита системы медный расплав-сталь / А.С. Затуловский, Ю.Н. Пономаренко // Процессы литья. – 2007. – №4. – С. 47–52.
- 4 Марукович Е.И. Моделирование процесса вертикального непрерывного литья проволочных заготовок / Е.И. Марукович, В.А. Пумпур, В.А. Харьков [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – №1. – С.12–15.
- 5 Марукович Е.И. Анализ тепловых особенностей формирования непрерывнолитых проволочных отливок // Е.И. Марукович, А.М. Брановицкий, Ю.А. Лебединский [и др.] / Литье и металлургия. – 2008. – № 2. – С. 5–7.
- 6 Масальский А.С. Исследование затвердевания стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ с целью совершенствования температурно-скоростного режима разливки / Автореферат диссертации на соиск. степени канд. техн. наук. - Магнитогорск - 2009.

- 7 Математическое моделирование процесса затвердевания медных и сталемедных заготовок при непрерывном литье / Титова Е.С., Сокол А.Н., Титова Т.М., Огурцов А.П., Полетаев В.П. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 274–278.
- 8 Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под ред. В. Даля, В. Антона. – М.: Metallurgija, 1986. – 566 с.
- 9 К. Мейер. Физико-химическая кристаллография. М.: Metallurgija, 1972. – 480 с.
- 10 Курчатov И. В., Кобеко П. П. Ионная и смешанная проводимость твердых тел // Курчатov И. В. Собрание научных трудов в 6 томах. Т. 1. – 2005. – С. 115-135.
- 11 Хевеши Г. Редкие земли с точки зрения строения атома [Электронный ресурс] : пер. с нем. Н. И. Владавец ; под ред. В. Г. Хлопина / Г. Хевеши, 1929. - 165 с.
- 12 Электротехнический справочник. Практическое применение современных технологий. – СПб.: Наука и Техника, 2014. – 592 с.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Андриенко П. Д. Влияние высших гармоник тока на выбор токопроводов систем питания кранов / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина, А. А. Андриенко // Электротехника і електромеханіка. - 2019. - № 3. - С. 24-29. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem\\_2019\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem_2019_3_6).
- 16 Электрический износ в паре трения токоприемник - контактный провод [Текст] // Железные дороги мира. - 2007. - № 5. - С. 43-49.
- 4 Marukovich E.I., Pumpur V.A., Khar'kov V.A. Modelirovanie processa vertikal'nogo nepreryvnogo lit'ja provolochnykh zagotovok. *Lit'e i metallurgija*. 2006. No 1. Pp. 12-15.
- 5 Marukovich E.I., Branovickij, Ju.A. Lebedinskij A.M. Analiz teplovykh osobennostej formirovanija nepreryvnolitykh provolochnykh otlivok. *Lit'e i metallurgija*. 2008. no 2. Pp. 5-7.
- 6 Masal'skij A.S. Issledovanie zatverdevanija stali v kristallizatore sljabovoj MNLZ s cel'ju sovershenstvovanija temperaturno- skorostnogo rezhima razlivki. *Avtoreferat dissertacii na soisk. stepeni kand. tekhn. nauk*. Magnitogorsk. 2009.
- 7 Titova E.S., Sokol A.N., Titova T.M., Ogurcov A.P., Poletaev V.P. Matematicheskoe modelirovanie processa zatverdevanija mednykh i stalemednykh zagotovok pri nepreryvnom lit'e. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija*. 2011. No 2. Pp. 274-278.
- 8 Statischeckaja prochnost' i mekhanika razrushenija stalej. Pod red. V. Dalja, V. Antona. Moscow: Metallurgija, 1986. 566 p.
- 9 Mejer K.. Fiziko-khimicheskaja kristallografija. Moscow: Metallurgija, 1972. 480 p.
- 10 Kurchatov I.V., Kobecko P.P. Ionная i smeshannaja provodimost' tverdyykh tel. *Sobranie nauchnykh trudov v 6 tomakh*. Т. 1. 2005. Pp. 115-135.
- 11 Kheveshi G. Redkie zemli s tochki zrenija stroenija atoma [Ehlektronnyj resurs] : per. s nem. N. I. Vlodevec ; pod red. V. G. Khlopina, 1929. 165 p.
- 12 Ehlektrotekhnicheskij spravochnik. Prakticheskoe primenenie sovremennykh tekhnologij. SPb.: Nauka i Tekhnika, 2014. 592 p.
- 13 Tsyganov V., Naumik V., Byalik H., Ivschenko L., Mokhnach R. Steel-copper nano composited materials. MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 439-443.
- 14 Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H., Mokhnach R., Sakhniuk N. Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems. MS and T 2019 - Materials Science and Technology 2019, pp. 450-456.
- 15 Andrienko P.D., Nemykina O.V., Andrienko A.A. Vlianie vysshikh garmonik toka na vybor tokoprovodov sistem pitaniya kranov. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2019. No 3. Pp. 24-29. Rezhim dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem\\_2019\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem_2019_3_6).
- 16 Ehlektricheskij iznos v pare trenija tokopriemnik - kontaktnyj provod [Tekst]. *Zheleznye dorogi mira*. 2007. No 5. Pp. 43-49.

#### References (transliterated)

- 1 Smirnov A.N., Antykuz O.V., Savenkov Ju.D. Osobennosti polunepregrvnoj rozlivki mednykh zagotovok i optimizacija rezhimov osciljacji kristallizatora. *Naukovi praci DonNTU. Metalurgija*. Vol. 11 (159). Pp.145–153.
- 2 Nedopekin F.V., Melikhov V.M., Belousov V.V. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamiki i taplomassoprenosa pri formirovanii kompozitnykh slitkov. *Tekhnichna fizika ta promislova teploenargetika*. 2009. vol. 1. Pp.149-158.
- 3 Zatulovskij A.S. Ponomarenko Ju.N. Teplofizika i kinetika formirovanija makroeterogenного litogo kompozita sistemy mednyj rasplav-stal'. *Processy lit'ja*. 2007. No 4. Pp. 47-52.

Поступила (received) 28.10.2020

*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.

**Андрієнко Петр Дмитрієвич (Андриенко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr)** – Національний університет «Запорізька Політехніка», д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: andrpd@ukr.net.