

Влияние объемной доли и дисперсности вольфрамовых частиц на электрическое сопротивление гетерогенного материала на медной основе

Т. А. Епифанцева, О. В. Власова, Ю. М. Солонин,
Г. А. Баглюк, М. Б. Штерн, А. Ю. Коваль

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: oksanavlasova@ukr.net

Результаты исследования удельного электрического сопротивления неспеченных опытных образцов на основе системы $Cu-W$, полученных холодным прессованием, в зависимости от количественного состава компонентов смеси (меди и вольфрама), дисперсности и их влияния на микроструктуру материала.

Ключевые слова: электропроводность, порошки, медь, вольфрам, холодное прессование.

Введение

В настоящее время облицовки для кумулятивных зарядов изготавливают механической обработкой литых заготовок на основе меди. Перспективным и более экономичным методом получения таких тонкостенных изделий со сложной геометрией является метод порошковой металлургии. Применение порошковых облицовок в комплекте кумулятивного заряда позволяет не только снизить количество отходов в производственном процессе их создания механической обработкой, но и получить изделие с уникальным комплексом свойств в материале. Благодаря содержанию в составе порошкового материала компонентов с разными физико-механическими и физико-химическими свойствами можно достигать заданной характеристики действия заряда. Одним из перспективных направлений повышения эффективности действия кумулятивных зарядов рассматривается использование порошковых облицовок на основе пластичной медной матрицы с содержанием включений тугоплавких металлов [1].

Настоящая работа посвящена решению практической задачи создания технологически прочных порошковых тонкостенных изделий конусной формы с определенным комплексом физико-механических свойств материала гетерогенного состава.

Теоретические разработки методов определения физических свойств порошковой гетерофазной системы в рамках общей теории физических и механических свойств порошковых гетерофазных тел представлены в работах [2—10]. Введение вольфрама в состав порошковой смеси на основе меди позволит повысить энергию кумулятивной струи за счет его физико-механических свойств (плотность — $19,3 \text{ г/см}^3$, плотность по Бринеллю — 300, относительное удлинение — 10%) [3, 4].

© Т. А. Епифанцева, О. В. Власова, Ю. М. Солонин, Г. А. Баглюк,
М. Б. Штерн, А. Ю. Коваль, 2018

Частицы пластичной матрицы (Cu) деформируются по определенным кристаллографическим направлениям согласно энергии взаимодействия между атомными плоскостями и зависят от величины межатомных потенциалов. Эти частицы определяют показатель энергетического запаса материала облицовки, который, в свою очередь, обуславливает эффективность действия кумулятивного заряда. Присутствие в составе материала облицовки жестких включений вольфрама позволит повысить эффективность действия заряда за счет структуры и физико-механических свойств компонентов смеси.

Цель настоящей работы — установить зависимость электропроводности холоднопрессованного материала гетерогенного состава на основе пластичной медной матрицы и жестких включений от размера и количества частиц компонентов смеси.

Постановка задачи

Выполнение поставленной задачи позволит прогнозировать физико-механические свойства порошкового холоднопрессованного материала на уровне контактообразования и его поведение при детонационном воздействии. Выявив зависимость электропроводности и микроструктуры гетерогенного холоднопрессованного материала от размера частиц компонентов смеси, можно решить вопросы, связанные с использованием материала в условиях экстремальных температур при высоких скоростях воздействия детонации. Контактные процессы в порошковой системе и структурные особенности материала облицовок определяют служебные свойства кумулятивных зарядов и являются главным объектом контроля и управления в технологических процессах их изготовления [1, 2]. Поэтому исследование физических параметров материала гетерогенного состава Cu—W в зависимости от структуры и исходных характеристик компонентов смеси — актуальная и нерешенная проблема при создании эффективного материала порошковых облицовок кумулятивных зарядов.

Зная исходные свойства компонентов смеси Cu—W, где твердость по Бринеллю и прочность различны в десятки раз ($HB_{Cu} — 35$, $HB_w — 300$), а прочность — в пять раз ($\sigma_{Cu} — 220$ МПа, $\sigma_w — 1200$ МПа), задачу формирования изотропной равновесной структуры можно решить с учетом масштабного фактора соотношения размера частиц матрица—включения и количества содержания их в смеси [8].

Объекты и методика испытаний

В качестве исходных порошков использовали медь марки ПМС-1 дисперсностью 40 мкм, вольфрам марок ПВ-2 и ПВТ дисперсностью 10 и 100 мкм. В работе исследовали призматические образцы размером 6,3 x 5,8 x 43,5 мм с содержанием вольфрама в смеси 10 и 32% (об.), которые изготовлены по одной технологической схеме. Исходные компоненты (Cu и W) смешивали 2 ч и прессовали на гидростатическом прессе П-483 при давлении 600—800 МПа.

Анализ структуры материала и микромеханизм разрушения поверхности неспеченных прессовок проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Superprobe-733 (JEOL, Япония). Микроструктуру прессовок оценивали в основном по двум

параметрам: распределению частиц включений и наличию дефектов в структуре неспеченного порошкового гетерогенного материала [7—9].

Электропроводность — величина, обратно пропорциональная электрическому сопротивлению. Удельное электрическое сопротивление образцов измеряли с помощью одинарно-двойного моста постоянного тока РЗОО9 с поэлементной проверкой и подстройкой, который предназначен для измерений в диапазоне от 10^{-8} до $1,1111 \cdot 10^8 \Omega$ при постоянном токе по ТЕ 3.454.019. Мост состоит из измерительного блока, автокомпенсатора (АК) и усилителя. Измерения проводили на призматических образцах с площадью поперечного сечения $S_{\text{сеч}} = 35\text{—}40 \text{ мм}^2$ следующим образом. К образцам подключали электроды и устанавливали значение моста (М1 и М2). Замыкали цепь батареи и устанавливали электрический ток по амперметру в цепи RX-RN путем изменения сопротивления реостатом Rp. Вольтметром определяли рекомендуемое напряжение и проводили измерение на АК.

Значение удельного электрического сопротивления рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{SR_0}{L}, \quad (1)$$

где S — площадь поперечного сечения образца, мм^2 ; R_0 — показания прибора, Ом; L — длина образца, м.

Измерения проводили при комнатной температуре, погрешность измерений составляла не более 5%.

Результаты исследований и их обсуждение

Объемная доля включений, дисперсность и относительная плотность исследуемых образцов представлены в таблице, а на рис. 1 — зависимость удельного электросопротивления от содержания и дисперсности вольфрама. Установлено, что частицы вольфрама, имея округлую форму (рис. 2, а), на начальной стадии консолидации смеси Cu—W закрепляются в объеме матрицы меди, состоящей из частиц дендритной формы (рис. 2, б). При уплотнении порошкового материала происходит искажение формы частиц меди и, как следствие, увеличивается величина накопленной деформации материала в прессовке [10].

Удельное электросопротивление порошковой меди (рис. 1) на неспеченных образцах составляет $0,0489 \text{ мкОм} \cdot \text{м}^2$, у литой меди — $0,0178 \text{ мкОм} \cdot \text{м}^2$. Следовательно, пористость 10% в порошковом материале прессовки приводит к повышению удельного электросопротивления почти в 2 раза по сравнению с литой медью. Наличие частиц включений вольфрама в составе гетерогенной смеси способствует

Относительная плотность холоднопрессованного порошкового материала гетерогенного состава Cu—W в зависимости от объемной доли и дисперсности частиц включений (W)

Состав образца	Объемная доля включений W, %	Дисперсность включений, мкм	Относительная плотность, %
1	—	—	93,5
2	10	100	93
3	10	10	90,6
4	32	100	92
5	32	10	85,2

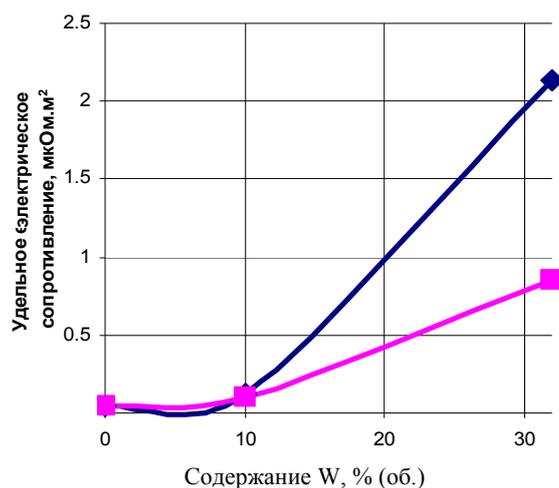


Рис. 1. Зависимость удельного электрического сопротивления от содержания и дисперсности вольфрама (мкм): \blacklozenge — 10; \blacksquare — 100.

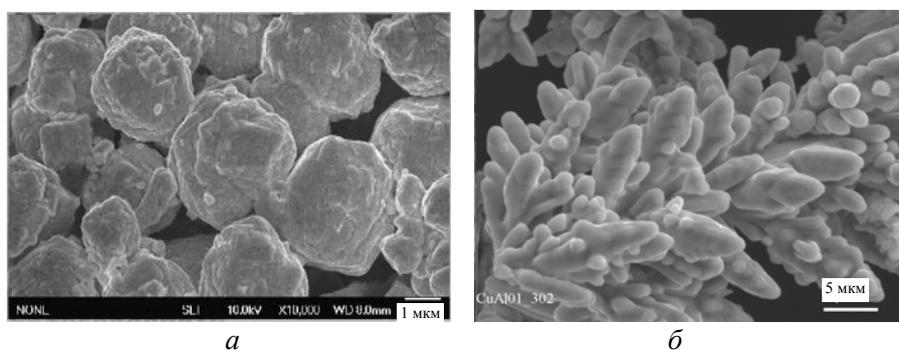


Рис. 2. Форма исходных частиц порошков W (а) и Cu (б).

увеличению удельного электрического сопротивления в 2 раза, величина которого зависит от количества введенного вольфрама (таблица).

Экспериментальные данные показали существенную зависимость удельного электросопротивления от дисперсности частиц включений вольфрама. Для составов 2, 3 и 4, 5, соответственно с 10 и 32% (об.) W, удельное электрическое сопротивление выше при дисперсности включений 10 мкм, чем для 100 мкм. Данный результат является косвенной характеристикой качества границ и величины площади межчастичного контакта в порошковом холоднопрессованном материале гетерогенного состава. Причиной более высокого значения удельного электросопротивления в материале прессовок состава 3 может быть повышенное значение окисленности порошка вольфрама с размером частиц 10 мкм.

Анализ микроструктуры поверхности прессовок и излома гетерогенного материала составов 2—5 позволил установить характер локального распределения включений вольфрама в матрице медных частиц (рис. 3). Поверхность разрушения (рис. 3) холоднопрессованных неспеченных образцов составов 2—5 имеет интеркристаллитный излом.

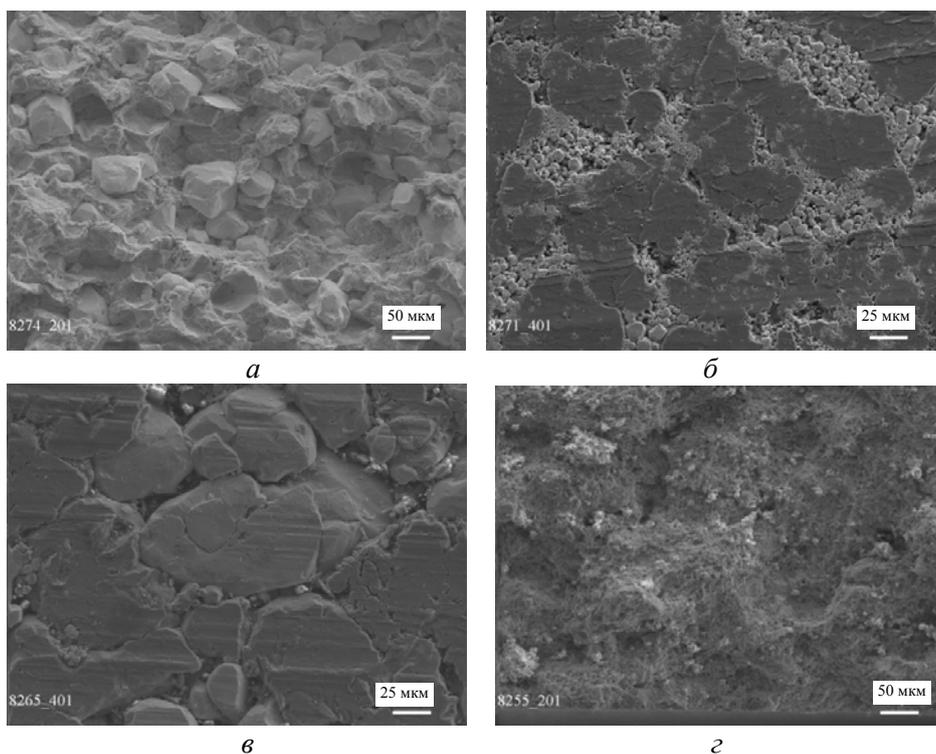


Рис. 3. Структура неспеченной прессовки на основе Cu—W составов 2 (а), 3 (б), 4 (в) и 5 (г).

Микроструктура образцов составов 2 и 4 (таблица, рис. 3, а, в), в которых размер частиц W составляет 100 мкм, отличается от таковой образцов составов 3 и 5 (таблица, рис. 3, б, г), где размер частиц W — 10 мкм. Структура порошковых прессовок состава 3 характеризуется наличием агломератов в объеме матрицы по причине формирования плоскости взаимопроникающих каркасов (рис. 3, в, г).

Таким образом, с изменением соотношения размера частиц компонентов смеси происходит эволюция структуры — изменяется ее топологический характер. Все фазы компонентов представлены одинаковыми структурными элементами — полиэдрами, заполняющими фазовое пространство системы. Статистический характер таких систем определяется тем, что на месте любого выбранного структурного элемента может оказаться фаза (j) твердого компонента с вероятностью $P_j = Q_j$. Модель двухфазной смеси гетерофазного состава изменяет топологический характер в зависимости не только от объемной концентрации фазы включений (10 или 32% (об.)), но и от величины соотношения размера частиц компонентов смеси на основе меди.

Используя структурные модели, разработанные Скороходом В. В. и представленные в работе [8], можно определить свойства многофазных материалов. Наиболее эффективным принципом вычисления физических свойств многофазных материалов с существенно различающимися свойствами является метод объединения модельного и континуального подходов. Порошковая система на основе пластичной меди с твердыми включениями (W) представляет собой матричную структуру, где фазы структурно

неравноправны при их любом объемном содержании (рис. 3, *a—z*). Изучение структуры материала прессовок составов 2—5 (рис. 2) подтвердило положение, предложенное Скороходом В. В. в работе [8] для матричных структур, что параметрами, определяющими особенность структуры и, как следствие, физические свойства материала, являются размер включений, расстояние между ними, угол ориентации в пространстве включений, координаты центров включений.

Анализ проведенных исследований электропроводности подтвердил, что концентрация фазы включений и размер частиц компонентов определяют структуру материала.

Структура материала прессовок составов 2—5 представляет собой нерегулярно выраженную анизотропию по объему прессовки, то есть матричную структуру со случайной ориентацией плоскостей. Данное положение позволяет для систем с такой структурой использовать метод самосогласованного поля, который изложен в работе [9]. Анализ микроструктуры прессовок гетерогенного материала показал разнообразность геометрической модели, что достаточно усложняет применение метода усреднения, который может дать эффективное расчетное значение свойств многофазной системы. Сделать это можно только при достаточно существенных ограничениях, следуя научным подходам для данных материалов, представленных в работах [7—9].

Используя расчетные параметры описания физических свойств гетерофазных систем на основе пластичной матрицы и включений, параметр проводимости гетерофазного материала можно выразить формулой [7]

$$\lambda_{\text{эф}}^{1/3} = \sum_{(i)} \lambda_i^{1/3} \theta_i, \quad (2)$$

где λ_i — величина проводимости i -й фазы (электропроводность, диэлектрическая или магнитная проницаемость); θ , θ_i — её объемное содержание.

При равной объемной концентрации фаз проводимость смеси равна среднему геометрическому значению проводимости фаз и может быть рассчитана согласно формуле [8]

$$\lambda_{\text{эф}}^{(2)} = \sqrt{(\lambda_1 \lambda_2)}. \quad (3)$$

С помощью выражения (3) можно рассчитать весь концентрационный интервал, последовательно вычисляя проводимость при разном отношении объемных долей фаз в смеси. Особенностью рассматриваемых порошковых смесей составов 2—5 является наличие больших различий в значениях электропроводности фаз ($\lambda_{\text{Cu}} = 59,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $\lambda_{\text{W}} = 18,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ или $\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{W}} = 5,0 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и присутствие неправильной случайной геометрии в системе прессовки. Данное положение приводит к решению вычисления эффективной проводимости — параметра "вилки" Фойхта—Рейсса в виде $\lambda_{\text{эф}}^n$ по формуле [8]

$$\lambda_{\text{эф}}^n = \theta_1 \lambda_1^n + \theta_2 \lambda_2^n. \quad (4)$$

При $n = 1$ получаем усреднение по Фойхту, а при $n = -1$ — по Рейссу. Если $-1 < n < 1$, то формула (4) описывает различные промежуточные случаи (при $n = 1/3$ формула определяет проводимость смеси с близкой проводимостью фаз).

При $n = 0$ соотношение (4) переходит в логарифмическую зависимость [8]

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1^0 + \lambda_2^0. \quad (5)$$

При использовании формул для расчета электрической проводимости порошковых двухфазных систем гетерогенного состава необходимо учитывать не только параметр проводимости фаз, но и особенность структуры холоднопрессованного материала, например присутствие пор разной величины, наличие объемной доли и размер частиц фаз. Учет совместно перечисленных факторов определяет показатели физических свойств порошкового материала при действии детонационных сил.

Изучение структуры материала прессовок гетерогенного состава Cu—W (рис. 3) и экспериментальных значений проводимости позволило считать гетерогенный материал составов 2—5 сильно структурночувствительным, что выражено разницей показаний электросопротивления в сотни раз (рис. 1). Этот результат делает перспективным использование принципов теории протекания [7—9] для формирования заданных характеристик порошкового материала для облицовок кумулятивного заряда.

Включения вольфрама дисперсностью 10 мкм повышают роль площади межчастичного контакта, формирующего матрицу прессовки. Присутствие в структуре порошкового прессованного материала межчастичного металлического контакта малой площади, образованного компонентом включений, способствует упрочнению материала прессовки. В порошковом материале гетерогенного состава выявлена особенность характера разрушения, который выражен сколом между частицами меди, частицы вольфрамовых включений удерживаются силами Ван-дер-Вальса [10].

Экспериментально установлен рост электросопротивления (рис. 1) с увеличением содержания частиц включений вольфрама в смеси. Рост электросопротивления с увеличением объемной доли компонента включений в смеси (таблица, состав 5) свидетельствует о роли площади межчастичного контакта и количества контакта механического или металлического происхождения в структуре материала холоднопрессованного изделия. Увеличение количества включений вольфрама в смеси (состав 5) повышает механические свойства гетерогенного материала [3].

Установлено, что увеличение количества компонента тяжелой фазы в смеси способствует повышению показателя электросопротивления в сотни и тысячи раз в сравнении с материалом прессовки чистой меди. Данный результат можно объяснить присутствием большой доли дефектов в виде магистральных пор, что и явилось причиной высокого показателя параметра электросопротивления порошкового холоднопрессованного гетерогенного материала (таблица, состав 5, рис. 3, з).

Проведя анализ экспериментальных исследований свойств электросопротивления и микроструктуры неспеченного материала прессовок, считаем, что формирование параметров структуры материала составов 2—5 зависит в большей степени от количества включений в смеси, чем от размера их частиц (например, составы 2 и 4 или составы 3 и 5). При сопоставлении результатов экспериментальных исследований электросопротивления и микроструктуры порошкового неспеченного материала составов 2—5 установлено, что наличие локального распределения пор не ухудшает физико-механические свойства материала прессовок [4].

Однако данный факт может оказать влияние на интенсивность протекания диффузионных процессов и перетекания границ при формировании структуры спеченных изделий.

В ходе исследований установлена чувствительность физического параметра электросопротивления от структурно-масштабного фактора, а именно присутствие в структуре материала определенного количества включений и размера частиц.

Выводы

Свойства неспеченного гетерогенного материала на основе медной матрицы зависят от объемной доли включений и размера частиц фаз, которые определяют параметры структуры и физические свойства порошковых изделий.

На основе полученных результатов можно выдать рекомендации по использованию порошкового гетерогенного материала состава Cu—W для облицовок кумулятивных зарядов. Особый интерес представляет порошковый материал, в котором присутствуют частицы гетерогенных фаз, отличных друг от друга в десятки раз, и максимальное содержание фазы включений.

Выполняя требования к материалу облицовок кумулятивных зарядов по электропроводности, необходимо учитывать структурные особенности порошкового материала, которые определены формой, размером и объемной долей компонентов в смеси.

Установлены высокие показатели проводимости в материале холоднопрессованного изделия состава Cu—W при одинаковом размере частиц и малой объемной доли включений (10% (об.)).

1. Сердюк Г. Г. Применение порошкового материала для нефтяных и газовых скважин / Г. Г. Сердюк, Т. А. Епифанцева, Л. И. Державец // Порошковая металлургия. — 1990. — № 4. — С. 38—42.
2. Епифанцева Т. А. Экспериментальный и теоретический анализ распределения плотности порошкового гетерогенного материала в прессовках конусной формы // Наукові нотатки: Зб. наук. ст. — Луцьк : ЛДТУ. — 2009. — Вип. 17. — С. 141—162.
3. Епифанцева Т. А. Особенности структуры и физико-механических свойства прессовок гетерогенного материала Cu—20% (мас.) W в зависимости от соотношения размеров частиц компонентов смеси $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ // Там же. — 2013. — Вип. 41 (1). — С. 70—74.
4. Епифанцева Т. А. Влияние соотношения размеров частиц компонентов смеси на структуру неспеченных прессовок гетерогенного материала Cu—30% (об.) W // Там же. — 2014. — Вип. 42, Ч. 1. — С. 70—75.
5. Скороход В. В. Некоторые проблемы технологии получения, исследования структуры и свойств нанокристаллических материалов // Труды IV Междунар. конф. по порошковой металлургии. — Карловы Вары, 1970. — С. 381—389.
6. Скороход В. В. Методы расчета физических свойств двухфазных спеченных сплавов с учетом их структуры // Там же. — С. 29—41.
7. Одолевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журн. техн. физики. — 1951. — 21, № 6. — С. 887—885.
8. Скороход В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. — 1995. — № 1/2. — С. 69—75.

9. Штерн М. Б. Механічні та компютерні моделі консолідації гранульованих середовищ на основі порошків металів і кераміки при деформуванні та спіканні / М. Б. Штерн, В. Д. Рудь. — Луцьк : ЛДТУ, 2010. — 59 с.
10. Епифанцева Т. А. Влияние жесткого компонента из вольфрамового сплава на процесс формования смесей на основе медного порошка и свойства гетерогенных неспеченных прессовок / [Т. А. Епифанцева, Ю. Н. Подрезов, Д. Г. Вербило и др.] // Порошковая металлургия. — 2006. — № 11/12. — С. 43—50.

Вплив об'ємної частки і дисперсності вольфрамових частинок на електричний опір гетерогенного матеріалу на мідній основі

Т. О. Єпифанцева, О. В. Власова, Ю. М. Солонін, Г. А. Баглюк,
М. Б. Штерн, А. Ю. Коваль

Результати дослідження питомого електричного опору неспечених дослідних зразків на основі системи Cu—W, отриманих холодним пресуванням, в залежності від кількісного складу компонентів суміші (міді та вольфраму), дисперсності та їх впливу на мікроструктуру матеріалу.

Ключові слова: електропровідність, порошки, мідь, вольфрам, холодне пресування.

The effect of the volume fraction and dispersion of tungsten particles on the electrical resistance of heterogeneous copper-based material

T. O. Epifantseva, O. V. Vlasova, Yu. M. Solonin, G. A. Bagliuk,
M. B. Stern, A. Yu. Koval

The results of the study of the electrical resistivity of non-sintered prototypes based on the Cu—W system obtained by cold pressing, depending on the quantitative composition of the components of the mixture (copper and tungsten), dispersion and their effect on the microstructure of the material.

Keywords: electrical conductivity, powders, copper, tungsten, cold pressing.