

УДК 621.762

Т. А. Епифанцева*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины***ВЛИЯНИЕ МАШТАБНОГО ФАКТОРА НА СВОЙСТВА ХОЛОДНОПРЕСОВАННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА МЕДЬ-ВОЛЬФРАМ**

Досліджено структуру і фізичні властивості гетерогенного холоднопресованого матеріалу на основі міді з додаванням твердого компоненту (W) залежно від розміру часток пластичної матриці і твердих часток. Встановлено закономірності формування структури матеріалу в залежності від співвідношення розмірів часток R (Cu) /R (W) у взаємозв'язку зі зміною властивостей електропровідності. Проаналізовано причини утворення дефектів у структурі, а також їх впливу на характер руйнування матеріалу. Показано, що структура гетерогенного матеріалу в неспеченому стані залежить від кількості включень та співвідношення розмірів часток матриці і включення. Досліджено характер руйнування пресовок гетерогенного матеріалу на основі міді з домішками вольфраму залежно від значення співвідношення розміру часток матриця/включення.

Ключові слова: кумулятивний заряд, холоднопресовані вироби, порошкова облицівка, структура гетерогенного матеріалу, електропровідність.

Т. А. Епифанцева**ВЛИЯНИЕ МАШТАБНОГО ФАКТОРА НА СВОЙСТВА ХОЛОДНОПРЕССОВАННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА МЕДЬ-ВОЛЬФРАМ**

Исследованы структура и физические свойства неспеченного гетерогенного материала Cu - W в зависимости от объемной доли и соотношения размеров частиц компонентов смеси. Выявлены закономерности формирования структуры материала прессовки в зависимости от размеров частиц во взаимосвязи с изменением электропроводности. Проанализированы причины формирования характерных дефектов структуры и их влияние на свойства и электропроводность материала. Показано, что структура гетерогенного материала в неспеченном состоянии находится в прямой зависимости от количества и соотношения размеров частиц компонентов смеси. Установлена причина характера разрушения прессовок гетерогенного материала на основе меди с добавками вольфрама, а также выданы рекомендации по достижению технологической прочности прессовок гетерогенного состава.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, неспеченные прессовки, порошковая облицівка, структура гетерогенного материала, электропроводность.

T.A. Epifantseva.**INFLUENCE OF THE SCALE FACTOR ON THE PROPERTIES OF COLD-PRESSED HETEROGENEOUS MATERIAL COPPER-TUNGSTEN.**

Structure and physical properties of a cold-pressed heterogeneous Cu-W material were investigated as a function of volume fraction and particle size ratio of the mixture components. Regularities of structure formation of a cold pressed compact in interrelation with particle size and electric conductivity were studied. Characteristic features of structural defects formation and their influence on some properties and electric conductivity are analyzed. It is shown that the structure of heterogeneous material in an unsintered state is directly dependent on the amount and particle size ratio of the mixture components. The cause and nature of the cold-pressed compacts destruction of heterogeneous copper-based material with tungsten additions were determined. Recommendations for achieving of technological strength of heterogeneous material compacts were formulated.

Keywords: shaped charge, cold-pressed compact, green bodies, heterogeneous composition, structure, electric conductivity.

Повышение оборонной способности Украины непосредственно зависит от технической оснащённости армии военной техникой, которая должна быть конкурентноспособной и эффективной в использовании. Перспективным направлением повышения действия кумулятивных зарядов (рис.1), является использование порошковых облицовок гетерогенного состава, где присутствуют пластичный и тяжелый металлы, например материал медь-вольфрам [1]. Холоднопресованные тонкостенные порошковые облицовки при снаряжении заряда должны обладать технологической прочностью, что связано с наличием определенной структуры материала, и эффективностью действия кумулятивной струи [2 - 4].

Создание порошковых облицовок с заданным комплексом свойств (прочность и пластичность материала компонентов, геометрия облицовки, функциональное назначение) непосредственно связано с выбором материала комплекующих. Перспективными можно считать порошковые облицовки на основе пластичной матрицы и включений вольфрама. При формировании кумулятивной струи особую роль играет структура материала облицовки.



Рис. 1. Кумулятивный малогабаритный заряд с порошковой облицовкой.

В связи с этим целесообразно установить особенности пористой структуры гетерогенного материала облицовки Cu - W в зависимости от масштабного фактора: размера частиц и объемной доли фаз в смеси. При создании прочных прессовок гетерогенного состава нерешенным вопросом остается влияние величины объемной доли и размера частиц компонентов смеси на формирование матрицы, наличие пор определенного размера, состояние границ матрица-включения. Определение оптимального содержания включений фазы вольфрама в структуре прессовок на основе медной матрицы позволит создать технологически прочные облицовки с необходимым уровнем функциональных свойств, которые обеспечат их эффективность применения в процессе эксплуатации заряда. Следуя общей теории физических и механических свойств гетерофазных тел [5 — 8], где предложена разработка методов вычисления физических свойств гетерофазной системы, задачей настоящих исследований является выявление зависимости физических свойств и структуры материала прессовки от содержания компонентов смеси. Установив зависимость электропроводности и структурных характеристик прессовок от комплекса свойств частиц компонентов смеси, можно прогнозировать физико-механические свойства материала и его поведение при образовании кумулятивной струи. Именно учет особенности системы с контактными явлениями, анизотропией микроструктуры позволяет выявить структурные особенности, которые в свою очередь определяют совокупность физических свойств, и являются главным объектом контроля и управления в технологических процессах изготовления [9].

Высокая структурная чувствительность большинства физических свойств, обусловлена существенной зависимостью от концентрации фаз, их морфологии, степени связности компонентов смеси [9]. Учитывая различие свойств компонентов смеси Cu - W: твердости по Брунелю в десять раз ($H_{Cu} = 35$ НВ, $H_W = 300$ НВ) и прочности в пять раз ($\sigma_{Cu} = 22$ кг/мм², $\sigma_W = 120$ кг/мм²). Задача формирования изотропной равновесной структуры может быть решена путем учета масштабного фактора соотношения размеров частиц матрица-включения.

Следуя положениям теории прочности хрупких тел предложенной Скороходом В.В [6], где рассматривается вопрос о соразмерности трещин со средним размером зерна, выбор оптимального соотношения размера частиц компонентов в смеси является актуальным. Решение практической задачи создания технологически прочных порошковых облицовок возможно путем изучения структуры и физической характеристики свойств электросопротивления материала прессовок с разным соотношением размера частиц и объемной доли компонентов в смеси.

В настоящей работе предусматривается использование 2-х вариантов соотношения размера частиц компонентов, которые отличаются в 10 раз, за счет использования частиц вольфрама 10 и 100 мкм. Исследование физических параметров материала гетерогенного состава Cu - W в зависимости от структуры и исходной характеристики компонентов смеси является актуальной и нерешенной проблемой. Из-за изотропии структуры гетерогенного материала [7,8], под воздействием нагрузок, в первую очередь деформируются частицы вдоль направления приложения сил деформации. Компонент включений на начальной стадии консолидации закрепляется в объеме матрицы, что приводит к увеличению накопленной деформации материала и как следствие к образованию трещин и пор. Частицы пластичной матрицы (Cu), которые деформируются по определенным кристаллографическим направлениям с учетом энергии взаимодействия между атомными плоскостями и зависят от величины межатомных потенциалов, определяют показатель энергетического запаса материала прессовки. Состояние энергетического

запаса порошкового матеріала в свою череду прогнозує ефективність дії облицовок при детонаційному впливі кумулятивного заряду.

Использование в составе порошковой смеси компонента вольфрама (W) в количестве 10 об. % (состав 2,3) или 32 об. % (состав 4,5), имело целью повышение служебных свойств облицовок в момент направленного действия кумулятивной струи. Применение компонента вольфрама позволит обеспечить высокую прочность кумулятивной струи за счет уникальных свойств материала $\sigma_p = 120 \text{ кг/мм}^2$, удельный вес $19,3 \text{ г/см}^3$, запас пластичности (относительное удлинение 10 %). Сочетание таких показателей прочности и пластичности позволяют создать гетерогенный композиционный материал высокой эффективности.

Цель настоящей работы – выявить особенность структуры неспеченных порошковых прессовок на основе меди и тяжелой фазы вольфрама в зависимости от количества и размера частиц компонентов в смеси. Установить влияние величины объемной доли включений тяжелой фазы и масштабного фактора размера частиц на физико-механические свойства холоднопрессованных изделий.

Объекты и методики испытаний. В работе исследовались образцы с фиксированным содержанием тяжелой фазы вольфрама в смеси: состав 1 Cu – 10% (объем) W, и состав 2 Cu – 32% (объем) W, которые изготовлены по одной технологической схеме формования до максимальной плотности (рис.2). Из исходных компонентов Cu и W, методом механического перемешивания (2 часа), были подготовлены гетерогенные порошковые смеси (состав 1-5), которые различаются количеством и соотношением размера частиц матрица - включение $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ (табл. 1). В состав шихт входил порошок со средним значением размера частиц: распыленной меди 100 мкм и вольфрама 10 мкм и 100 мкм. Изделия получали методом холодного прессования на гидравлическом прессе П. 483, давлением 8 т/см^2 , до максимальной плотности. Анализ структуры материала и микромеханизма разрушения поверхности неспеченных прессовок проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЕМ) Super probe 733 (JEOL, Япония). Микроструктура прессовок оценивалась в основном по двум параметрам: распределению частиц твердых включений в материале и наличию в структуре дефектов различного типа [7 - 9]. Электропроводность материала измеряли при комнатной температуре с помощью моста постоянного тока Р30009 (погрешность измерений составляла не более 5%).

Результаты исследований и их обсуждение. Структура материала прессовки гетерогенного состава при изменении концентрации фаз и соотношения размеров частиц отражена на рис. 2, а-д. Используя конкретные структурные модели, разработанные Скороходом В. В и представленные в работе [9], можно вычислить свойства реальных 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 гетерогенными включениями представляет собой матричную структуру, где фазы структурно неравноправны при их любом объемном содержании. (рис. 2 а-д). Изучение структуры материала прессовок состава 2-5 (рис.2) подтвердило положение, высказанное Скороходом В. В. в работе [8] для матричных структур, о том, что параметрами, определяющими особенность структуры и, как следствие, физических свойств, являются размер включений, расстояние между ними, угол ориентации в пространстве, координаты центров включений.

Установлено, что рассматриваемые структуры являются нерегулярными с выраженной анизотропией. Рассматриваемый материал состава 2-5 относится к классу нерегулярных гетерофазных систем, и составляют так называемые статистические изотропные смеси. Анализ проведенных исследований подтвердил, что концентрация фаз компонентов смеси предопределяет структурную характеристику материала. Чем ближе значение соотношения объемной доли компонентов в смеси к единице, тем выше вероятность формирования плоскости взаимопроникающих каркасов частиц в виде агломератов рис. 2, в и д. (состав 3 и 5). Замечено, что с ростом соотношения $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ в 10 раз, за счет уменьшения размера частиц твердой фазы, (табл. 1, состав 2 и 3) способствует формированию структуры, где материал является собой статистически изотропную смесь. Установлено, что с изменением показателя соотношения размера частиц компонентов смеси происходит эволюция структуры - меняется топологический характер. Все фазы 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 $P_j=Q_j$. Таким образом, модель двухфазной смеси гетерофазного

состава меняет топологический характер не только в зависимости от объемной концентрации фазы включений (10 объем. %, 32 объем %), но и от величины соотношения размера частиц компонентов $R(\text{Cu})/R(\text{W})$.

Изучение структуры прессовок гетерогенного порошкового материала состава 2- 5 выявило присутствие матричной структуры со случайной ориентацией плоскостей. Данное положение позволяет для систем с такой структурой использовать метод самосогласованного поля, который подробно изложен в работе В.В. Скорохода [9]. Анализ микроструктуры прессовок гетерогенного материала позволил констатировать разнообразность геометрической модели, что достаточно усложняет подход метода усреднения, который может дать эффективное расчетное значение свойств многофазной системы. Сделать это возможно только при достаточно существенных ограничениях следуя научным подходам для данных материалов, данных в работах [7,8,9]. Используя расчетные параметры описания физических свойств гетерофазных систем на основе пластичной матрицы и включений, параметр электропроводимости гетерофазного материала может быть выражен по формуле [7]:

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

Пре равных объемных концентрациях фаз, проводимость смеси равна среднему геометрическому из проводимостей фаз, и может быть рассчитана по формуле (2), [8]:

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

С помощью выражения (2) можно рассчитать весь концентрационный интервал, последовательно вычисляя проводимость при отношениях объемных долей фаз в смеси. Особенностью рассматриваемых смесей состава 2-5 является наличие больших различий значений проводимости фаз ($\rho_{\text{Cu}}=0,5 \cdot 10^8$ м Ом м², $\rho_{\text{W}}=5 \cdot 10^8$ м Ом м²) и неправильной случайной геометрии системы, рис.2. Данное положение приводит к решению вычисления эффективной проводимости - параметра "вилки" Фойхта—Рейсса в виде $\lambda_{\text{эф}}^n$ (3) [8]:

$$\lambda_{\text{эф}}^n = \theta_1 \lambda_1^n + \theta_2 \lambda_2^n \quad (3)$$

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

При $n=0$ соотношение (3) переходит в логарифмическую зависимость (4) [8]:

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

Для расчета электрической проводимости двухфазных систем гетерогенного состава, где в структуре материала прессовки присутствуют разной величины поры, содержание объемной доли фаз и соотношение размеров частиц компонентов $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ все вместе определяет свои особенности при использовании формул.

Изучение структуры холоднопрессованного материала гетерогенного состава Cu - W (рис. 2) во взаимосвязи со значениями электросопротивления, позволило считать составы 2 - 5 сильно структурно-чувствительным, что выражено разницей измеренных значений электросопротивления в десятки раз. Этот результат позволил считать перспективным подход использования принципов теории, изложенной в работах [7, 8, 9] для формирования заданных характеристик порошкового материала прессовок.

Использование включений вольфрама малого размера, при соотношении размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$, приводит к повышению роли включений в упрочнении прессовки, характер разрушения выражен сколом между частицами меди [10]. Экспериментально установлен рост показателя электросопротивления с увеличением содержания частиц включений вольфрама в смеси.

Рост электросопротивления с увеличением объемной доли фазы включений в смеси свидетельствует о качестве контакта в структуре материала прессовки, что является определяющим фактором при формировании механических свойств материала. Увеличение количества компонента тяжелой фазы в смеси способствует повышению показателя электросопротивления (иногда на порядок и более) по сравнению со значениями, измеренными на прессовках из чистой меди. Такой показатель можно объяснить за счет присутствия большой доли дефектов в виде магистральных пор, что и явилось причиной высоких значений

електросопротивлення.

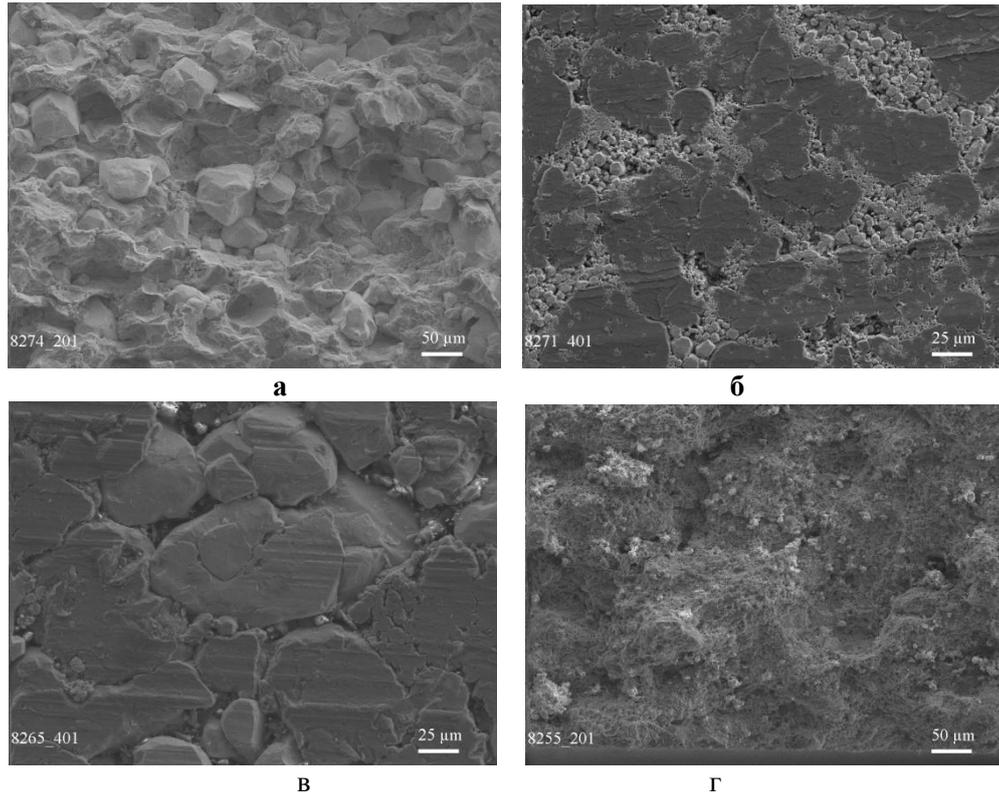


Рис. 2. Структура неспеченої пресівки гетерогенного складу Cu-W :
а - склад 2, б – склад 3, в – склад 4, г – склад 5.

Таблиця 1.

Зависимость электросопротивления материала пресовок гетерогенного состава Cu-W от объемной доли включений и соотношения размеров частиц компонентов смеси R(Cu)/R(W).

Состав	Объемная доля включений, θ_2 , %	Размер частиц включений, мкм	R(Cu) / R(W)	Удельное электросопротивление, мк Ом м
1	-	-	-	0,0489
2	10	100	1	0,0951
3	10	10	10	0,1254
4	32	100	1	0,8511
5	32	10	10	2,1305

Изучив качественную картину микроструктуры пресовок гетерогенного состава и проведя анализ экспериментальных исследований свойств электросопротивления неспеченного материала, считаем, что формирование параметров структуры, неспеченой пресівки на основе медной матрицы, которая содержит фазу включений вольфрама с соотношением размера частиц R(Cu)/R(W) = 10, позволит создать технологически прочные неспеченные порошковые облицовки.

При сопоставлении результата экспериментальных исследований электросопротивления и картины микроструктуры неспеченных пресовок установлено, что присутствие крупных пор, локально распределенных в объеме пресівки, не ухудшает параметр прочности материала. Однако, данный факт, может оказать решающую роль 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. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что технологические свойства неспеченного гетерогенного материала на основе медной матрицы зависят от объемной доли включений и соотношения размера частиц матрица-включения, которые определяют параметры структуры и физические свойства прессовок.

На основе полученных результатов, можно рекомендовать к использованию в кумулятивных зарядах порошковые облицовки гетерогенного состава Cu – W, где присутствует соотношение размера частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W})=10$ и объемная доля включений 32 объем. %.

1. Сердюк Г.Г., Епифанцева Т.А., Державец Л.И. Влияние структурных характеристик материала порошковой облицовки на эффективность их использования // Труды конференции. – Киев: Мин. Маш. –1989. – С. 53-56.
2. Епифанцева Т.А. Экспериментальный и теоретический анализ распределения плотности порошкового гетерогенного материала в прессовках конусной формы Наукові нотатки. Зб.наук.ст..ЛДТУ, Вип. 17, Луцьк, ЛТДУ, 2009. – 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 $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ Наукові нотатки. Зб.наук.ст. ЛДТУ, Вип. 17, Луцьк, ЛТДУ, 2013. – С. 141-162.
4. Епифанцева Т. А. Влияние соотношения размеров частиц компонентов смеси на структуру неспеченных прессовок гетерогенного материала си-30%объем.w Наукові нотатки. Зб.наук.ст.ЛДТУ, Вип. 42, частина 1, Луцьк, 2014. – С. 70-75.
5. Скороход В.В. Некоторые проблемы технологии получения,исследования структуры и свойств нанокристаллических материалов // Тр. IV Международн. 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 // Тр. IV Международн. Конф. По порошковой металлургии. – Карловы Вары, 1970. – С. 29-41.
7. Одолевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. // Журн.техн.физики, 1951. – 21, № 6. – С. 887-685.
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., Рудь В.Д. Механічні та компютерні моделі консолідації гранульованих середовищ на основі порошків металів і кераміки при деформуванні та спіканні. Луцьк. – 2010. – С. 78-79.
10. Епифанцева Т.А., Подрезов Ю.Н., Д. Г Вербило, В.Г.Каюк, И.Д Мартюхин, Г.Г Сердюк Влияние жесткого компонента из вольфрамового сплава на процесс формования смесей на основе медного порошка и свойства гетерогенных неспеченных прессовок //Порошковая металлургия"2006. – №11/12. – С. 43-50.

Стаття надійшла в редакцію 25.03.2015.