

УДК 621.762

**Т. А. Епифанцева***Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины***ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ КОМПОНЕНТОВ  
ГЕТЕРОГЕННОЙ СМЕСИ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА НЕСПЕЧЕННЫХ ПРЕССОВОК**

*Исследованы влияние соотношения размера частиц матрица/включения на формирование структуры и механические свойства холоднопрессованного гетерогенного материала на основе меди с добавкой 30% твердого компонента (W). Установлены закономерности формирования структуры материала в зависимости от соотношения размеров частиц R(Cu)/R(W) во взаимосвязи с изменением ряда свойств: плотности, прочности на изгиб и модуль упругости. Проанализированы причины создания и влияние дефектов структуры на механические свойства и характер разрушения материала. Установлено, что структура гетерогенного материала в неспеченном состоянии изотропна вне зависимости от соотношения размеров частиц матрица/включения. Исследован характер разрушения прессовок гетерогенного материала на основе меди с добавками вольфрама в зависимости от величины соотношения частиц матрица/включения.*

*Ключевые слова:* порошковые неспеченные прессовки, облицовка, структура гетерогенного материала.

*Рис. 3. Табл. 1. Лит. 15.*

**Т. О. Єпифанцева****ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ РОЗМІРУ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ  
ГЕТЕРОГЕННОЇ СУМІШІ НА СТРУКТУРУ І ФІЗИКО -МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
НЕСПЕЧЕНИХ ПРЕСОВОК**

*Досліджено вплив співвідношення розміру часток матриця/вкращлення на формування структури і механічні властивості холоднопресованого гетерогенного матеріалу на основі міді з додаванням твердого компоненту (W) в кількості 30% об'ємної долі. Встановлено закономірності формування структури матеріалу в залежності від співвідношення розмірів часток R (Cu) /R (W) у взаємозв'язку зі зміною деяких властивостей: щільність, міцність на згин і модуль пружності. Проаналізовано причини утворення та впливу дефектів у структурі на механічні властивості і характер руйнування матеріалу. Зазначено, що структура гетерогенного матеріалу у неспеченому стані є ізотропно незалежно від 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:* порошкові неспечені пресовки, облицовка, структура гетерогенного матеріалу.

**T. A. Epifantseva****INFLUENCE OF THE RATIO OF HETEROGENEOUS MIXTURE COMPONENTS  
PARTICLE SIZE ON THE STRUCTURE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF  
COLD-PRESSED COMPACTS**

*Interrelation between the structure and some properties of a cold-pressed heterogeneous material with a copper matrix with 30 vol.% of solid component (W) additives and the particle size of its constituents, i.e., of the plastic matrix and solid component, have been investigated. Regularities of material structure and some properties (density, bending strength, elastic modulus) formation depending on particle size ratio R (Cu)/R (W) were determined. Causes of characteristic structural defects formation have been analyzed as well as their influence on mechanical properties and fracture mechanism of the investigated material. It was shown that the structure of the heterogeneous material under investigation is isotropic regardless of the particle size ratio R (Cu)/R (W). Mechanisms of the heterogeneous material Cu-30wt.%W failure are discussed in interrelation with the matrix/inclusion particle size ratio.*

*Keywords:* cold-pressed compact, conical shape, heterogeneous composition, structure.

Создание технологически прочных пористых изделий сложной формы из композиционного материала гетерогенного состава содержащего компонент тяжелой тугоплавкий фазы представляет практический интерес для повышения кумулятивного эффекта в сфере высоких скоростей (2000- 6000 м/сек), давлений (~1000 МПа) и температур (более 1000 °С). Повышение эффекта проникновения кумулятивной струи невозможно без создания порошковых облицовок определенной структуры (рис.1), которая обеспечит необходимые характеристики материала для запреградного действия [1]. Пористые изделия из гетерогенного порошкового материала на основе меди для практического применения должны обладать достаточной технологической прочностью. В связи с этим целесообразно изучить особенности формирования пористой структуры материала прессовки и ее роль в формировании физико-механических свойств изделий.



Рис. 1. Прессованная порошковая облицовка

При решении задач формирования порошковых изделий с заданными функциональными свойствами материал рассматривали как масштабный структурный фактор, учитывая состояние границ раздела. По теории Гриффитса [2] роль масштабного фактора учитывалась для достижения, требуемых структурно-чувствительных механических свойств, таких как предел текучести и прочности. В настоящей работе рассмотрена роль величины соотношения размера частиц компонентов смеси на формирование свойств прессовок. Следуя положениям теории Скорохода В.В. для определения предела прочности хрупких тел [3], где рассматривается вопрос о соразмерности трещин со средним размером зерна, для решения практических задач (создание технологически прочных изделий) представляет интерес изучения микроструктуры прессовок при разном соотношении размера частиц компонентов смеси гетерогенного состава при наличии полного отсутствия их взаиморастворимости.

Исследование физических параметров материала гетерогенного состава в зависимости от структуры и исходной характеристики компонентов смеси является актуальной и нерешенной проблемой. Из-за изотропии структуры гетерогенного материала на основе меди [4-6], 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 (Си), 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 материала в свою очередь прогнозирует эффективность действия облицовок при детонационном воздействии кумулятивного заряда.

Использование в составе порошковой смеси тяжелого компонента вольфрама (W), в количестве 30% объем, имело целью повышение служебных свойств облицовок в момент направленного детонационного воздействия, что должно быть обеспечено высокой прочностью вольфрама ( $TС -5M \sigma_p = 120 \text{ кг/мм}^2$ ), его высоким удельным весом ( $19,3 \text{ г/см}^3$ ) и достаточным запасом пластичности (относительное удлинение - 10 %). Сочетание таких показателей прочности и пластичности позволяют создать гетерогенный композиционный материал высокой эффективности на основе пластичной матрицы [7- 9].

Цель настоящей работы – изучить особенности структуры неспеченных прессовок из порошкового гетерогенного материала на основе меди и тяжелой фазы вольфрама в зависимости от соотношения размера частиц компонентов в смеси R(Cu)/R(W). Установить влияние величины соотношения размеров частиц матрица – включения на микроструктуру и физико-механические свойства материала неспеченной прессовки.

**Объекты и методики испытаний.** В работе исследовались порошковые прессовки гетерогенного состава Cu – 30% (объем) W, с фиксированным содержанием тяжелой фазы вольфрама в смеси, изготовленные по одной технологической схеме формования до максимальной плотности. Из исходных компонентов Cu и W, методом механического перемешивания (2 часа), были подготовлены порошковые смеси (состав 1-4), которые различаются соотношением размера частиц матрица/включение (табл. 1). В состав шихт входил порошок распыленной меди со средним значением размера частиц 40 мкм (состав 2 и 4) и 100 мкм (состав 1 и 3) и вольфрама со средним значением размера частиц 10 мкм и 100 мкм. Смеси уплотняли двухсторонним прессованием до предельной плотности, которой соответствует некоторое критическое давление, при превышении которого наблюдается расслой материала в прессовке, табл. 1. Образцы

изготовлены прецизионным двухсторонним прессованием до упора (ГОСТ 29012 –91) при усилии прессования 63 ТС на прессе П-483. Плотность пористых прямоугольных образцов размером 4,36 x 6,3 x 43,6 мм<sup>3</sup> определяли расчетным методом по ГОСТ 18898-89. С целью определения влияния присутствия тяжелого компонента в смеси на структурные характеристики неспеченных прессовок и их некоторые физико-механические свойства, параллельно изготовлены и испытаны образцы из порошков чистой меди из фракции 40 мкм и 100 мкм, соответственно состав 5 и 6.

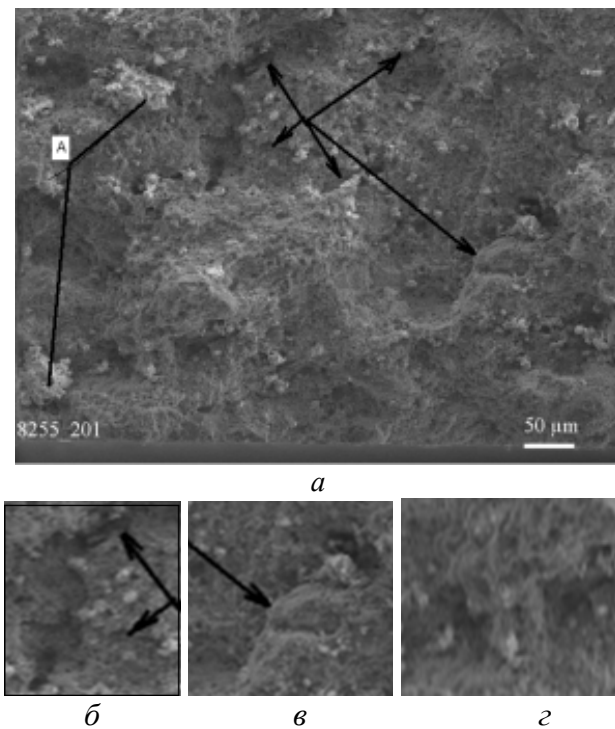
Анализ структуры материала и микромеханизм разрушения поверхности неспеченных прессовок проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЕМ) Superprobe 733 (JEOL, Япония). Результаты фрактографического анализа исследованных материалов позволили установить расположение частиц, образующих прочный каркас в объеме прессовок, а также морфологию структуры и ее взаимосвязь с содержанием и размером частиц вольфрама в смеси [10]. Фрактограммы исследованных холоднопрессованных материалов представлены на рис. 1 и рис. 2. Фрактографический анализ позволил выявить роль изменения соотношения размера включений твердого компонента (W) относительно размера частиц материала матрицы (Cu) на основные механические свойства неспеченных прессовок. Микроструктура прессовок оценивалась в основном по двум параметрам: распределению частиц твердых включений в материале и наличию в структуре дефектов различного типа [11, 12].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Фактографический анализ поверхностей разрушения неспеченных прессовок выявил существенные различия в характере разрушения гетерогенного материала одного состава Cu-30%объем.W в зависимости от величины соотношения размера частиц матрица/твердые включения. При изучении поверхности излома прессовок ввиду высокой жесткости твердых включений и отсутствия взаимной растворимости между частицами меди и вольфрама, установлен факт формирования изотропной структуры, где основным параметром, характеризующим формирование матрицы прессовки, является величина площади единичного межчастичного контакта между пластичными частицами меди. Частицы вольфрама фиксируются в вязкой медной матрице. Ввиду большой разницы величин удельного веса порошка вольфрама (19,26г/см<sup>3</sup>) и удельного веса порошка электролитической меди (8,96 г/см<sup>3</sup>) в процессе засыпки в пресс-форму до известной степени может нарушаться гомогенность исходных смесей, тяжелые частицы вольфрама неравномерно распределяться в структуре холоднопрессованного материала.

Наличие пор вблизи от частиц вольфрама, а также локальное нарушение гомогенности смеси в виде скоплений частиц вольфрама в медной матрице ( образование агломератов рис. 2, а) могут свидетельствовать о:

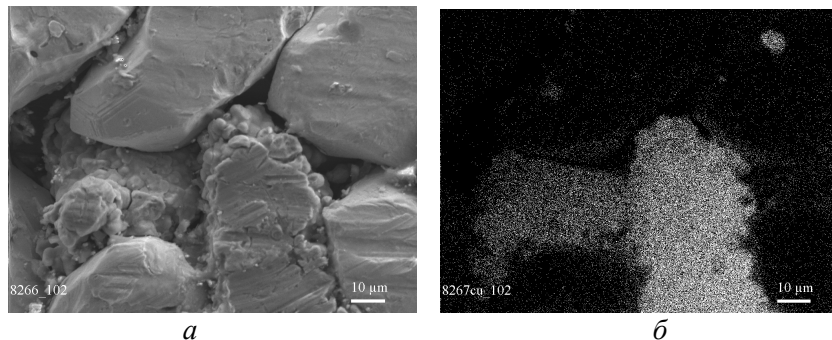
- роли величины удельной плотности материала вводимых в материал твердых включений на частичное нарушение гомогенности порошковой смеси при засыпке в прессформу;
- влиянии размера частиц вольфрама, который определяет занимаемый объем в смеси;
- отсутствие взаимной растворимости между частицами матрица-включения, где включения обладают особыми физико-химическими свойствами, высокой жесткостью и отсутствием текучести, их влияние на процесс локализации в объеме вязкой матрицы (меди).

В работе установлен изотропный характер структуры материала Cu-30%объем.W при любом показателе соотношения размера частиц компонентов смеси. Присутствие крупных частиц вольфрама в составе смеси приводит к повышению степени деформации порошкового материала при консолидации, и как следствие, в результате пластической деформации происходит изменение формы частиц меди и создание прочного металлического контакта. При консолидации порошковой смеси состава 1, с соотношением размера частиц  $R(Cu)/R(W) = 10$ , частицы вольфрама (10 мкм) распределены по всему объему в виде небольших агломератов (п. А рис. 2, а), а так же отдельных частиц расположенных на поверхности, прилегающей к поре (рис. 2, а, б). Поверхность излома прессовок с соотношением  $R(Cu)/R(W) = 10$ , характеризуется наличием трещин и пор, (рис. 2, а-в). Причиной их образования предположительно является действие сил упругого последействия, возникающее при выпрессовке. Для структуры характерно присутствие трещин расслоения в матрице, которые могут образовываться под действием сдвиговых деформаций.



**Рис. 2. Изображение микроструктуры прессовки гетерогенного состава с соотношением  $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ , полученное во вторичных электронах: *a* – общий вид в направлении прессования; *б, в, з* – фрагменты дефектов, наличие трещин и пор**

При изучении структуры материала с соотношением размера частиц  $R(\text{Cu})/R(\text{W})=1$ , состав 3, установлено, что частицы вольфрама (100 мкм) препятствуют формированию металлического контакта между частицами меди, которые формируют матрицу прессовки (рис. 3). Для структуры прессовок из гетерогенной порошковой смеси с соотношением размеров частиц  $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$  характерно присутствие трещин, соизмеримых по длине с размером частиц включений вольфрама (рис. 3а).



**Рис. 3. Микроструктура прессовки с соотношением размера частиц  $R(\text{Cu})/R(\text{W})=1$ , SEI, ув. X200: *a* – поверхность прессовки во вторичных электронах; *б* – изображение частиц вольфрама, полученное в характеристическом излучении  $W L_{\alpha}$**

Следовательно, частицы вольфрама размером 100 мкм занимая достаточный объем в составе смеси (30%), затрудняют консолидацию медных частиц и образование прочной матрицы, и как следствие происходит формирование изделий с большим количеством дефектов. Высокая пористость прессовок состава 3 (21%), а также высокая концентрация дефектов в основном в виде трещин (рис. 3) приводит к невозможности корректного измерения механических свойств материала. При измерении прочности материала на изгиб и модуля упругости часто происходит самопроизвольное разрушение образца, табл. 1.

Анализ микроструктуры прессовок с разным соотношением размера частиц компонентов позволил установить, что частицы вольфрама фиксируются в вязкой медной матрице еще на первой стадии уплотнения. Это можно объяснить большой разницей величин удельного веса

порошка вольфрама ( $19,26\text{г/см}^3$ ) и электролитической меди ( $8,96\text{ г/см}^3$ ). Вследствие более чем двукратной разницы удельного веса компонентов смеси в процессе засыпки последней в пресс-форму до известной степени может нарушиться гомогенность исходных смесей, тяжелые частицы вольфрама неравномерно распределяются в структуре холоднопрессованного материала, рис. 2, а.

В ходе эксперимента установлено, что величина соотношения размеров частиц матрица – включения влияет на характер структуры (присутствие трещин, пор, агломератов), на локализацию тяжелых частиц в объеме медной матрицы, что в свою очередь определяет физико-механические свойства материала прессовки, табл. 1.

**Таблица 1. Влияние соотношения размеров частиц компонентов порошковой смеси гетерогенного состава Cu- 30% объем W на физико-механические свойства неспеченных прессовок**

№ состава	R(Cu)/R(W)	Пористость, %	Прочность на изгиб, МПа	Модуль упругости, ГПа
1	10	13	23,4	64
2	4	10	40,2	94
3	1	21	рассыпался	
4	0,4	4,2	30	-
5	-	4,6	45	84
6	-	5,3	49,5	98

Результаты экспериментальных исследований показали, что при соотношении R(Cu)/R(W) = 1, а средний размер частиц компонентов составляет 100 мкм, порошковая смесь недостаточно консолидируется, изделие может самопроизвольно разрушаться. При соотношении размера частиц R(Cu)/R(W) < 1, например 0,4, достигается максимальная плотность материала после холодного прессования (средние значения пористости прессовки составляют 4,2 %), однако прочность прессовок остается крайне низкой. Последнее можно объяснить высоким объемным содержанием крупных включений твердого компонента, которые препятствуют образованию прочного контакта между частицами меди. Сплошность матрицы нарушается, что приводит к потере прочности прессовок.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что размер частиц твердых включений, при учете величины соотношения размера частиц R(Cu)/R(W), определяют структуру неспеченного порошкового гетерогенного материала и физико-механические свойства прессовки при фиксированной величине объемной доли включений в смеси. Установлено, что присутствие частиц вольфрама размером 100 мкм в составе гетерогенной смеси на основе пластичной матрицы (состав 3,4), приводит к ухудшению прессуемости материала, и как следствие к отсутствию технологической прочности и разрушению прессовок.

Использование в составе смеси частиц вольфрама размером 10 мкм (соотношение размеров частиц матрица/включения R(Cu)/R(W) = 4 (или 10) привело к повышению показателя остаточной пористости в 2,5 и более раз в сравнении с прессовкой из чистой меди того же размера (табл. 1, состав 1, 4).

Исследования показали, что при формировании свойств материала прессовок состава Cu – W, путем заданного количества объемной доли включений и соотношения размера частиц компонентов смеси, можно достичь оптимальной структуры и физико-механических свойств материала, которые способны обеспечить эффективность действия порошковых облицовок при их функциональном назначении. Например, материал прессовки из чистой меди с размером частиц 40 мкм, при  $\theta = 4,6\%$ , имеет прочность на изгиб  $\sigma = 45$  МПа и модуль упругости  $E = 84$  ГПа, а материал гетерогенного состава при  $R_{Cu}/R_W = 4$ , при  $\theta - 10\%$ , обладает прочностью на изгиб и модулем упругости соответственно  $\sigma = 40, 2$  МПа и  $E = 94$  ГПа. Следовательно, при создании облицовок эффективного действия из порошкового материала гетерогенного состава на основе пластичной матрицы и тяжелой фазы в количестве 30 объем.% целесообразно использовать компоненты смеси с соотношением размера частиц  $1 < R(Cu)/R(W) < 10$ .

Структура материала с соотношением R(Cu)/R(W) = 4, где размер частиц вольфрама составляет 10 мкм, характерна тем, что частицы вольфрама располагаются как в межчастичном пространстве, так и на поверхности частиц меди, при этом в порах частиц вольфрама не наблюдалось. Для структуры материала с соотношением R(Cu)/R(W) = 10 характерно наличие

трещин, материал может рассматриваться как изотропный, и на модуль упругости холоднопрессованного материала присутствие таких трещин существенного влияния по всей видимости не оказывает по сравнению с ролью величины соотношения размеров частиц.

Интересным представляется результат влияния размера частиц меди на формирование структуры и физико-механических свойств гетерогенного материала прессовки состава Cu - W, т.к. именно медь определяет величину площади единичного межчастичного контакта металлического типа связи. Анализ фрактограмм позволяет утверждать, что в структуре гетерогенного материала на основе пластичной медной матрицы характерно присутствие пор, формирование которых является следствием высокой упругости материала. Последняя в основном определяется упругими свойствами частиц вольфрама, проявляющейся при снятии с материала внешней нагрузки.

Фрактографические исследования структуры материала прессовок одного состава Cu – 30% (объем) W с разным соотношением размера частиц матрица/включение позволили выявить особенности расположения частиц включений в объеме пластичной медной матрицы. В работе показано, что характер формирующейся микроструктуры прессовок исследуемого гетерогенного материала зависит как от размера частиц меди, так и от размера частиц включений вольфрама, причем материал прессовки имеет изотропную структуру для всех значений соотношения  $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ . Структура поверхности излома прессовки гетерогенного материала зависит от величины соотношения размеров частиц матрица/включение и может до определенной степени варьироваться, что позволяет утверждать, что характер разрушения гетерогенного материала также имеет заметные различия для каждой величины соотношения  $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ .

Следует отметить, что в структуре материала прессовки гетерогенного состава формирование межчастичных контактов с механическим типом связи между частицами Cu -W понижает прочностные и упругие свойства материала в сравнении с медной матрицей, образующей металлический контакт. Чем большее количество контактов механического типа присутствует в структуре гетерогенного материала прессовки, тем ниже показатели технологической прочности изделий (состав 1,2, таблица 1). Причем, следует отметить существенное влияние на прочность порошковых прессовок величины площади единичного межчастичного контакта механического типа связи, которая в свою очередь зависит от размера частиц включений.

Установлено, что несмотря на более высокую пористость и присутствие достаточно большого количества частиц включений вольфрама размером 10 мкм, неспеченные прессовки состава 2, где  $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$ , имеют близкие значения прочности при изгибе и модуля упругости с прессовками из чистой меди. Данный результат свидетельствует о роли размера частиц меди, формирующих матрицу прессовки и присутствие в структуре материала небольших скоплений вольфрама в виде агломератов (табл.1). Особенность рассматриваемой структуры прессовки заключается в формировании контактов двух видов – металлического Cu - Cu и механического происхождения Cu -W и W -W, где фазы, составляющие порошковую смесь, имеют близкие значения коэффициента Пуассона. Полученные результаты согласуются с теорией В. В. Скорохода раскрывающей влияние единичного межчастичного контакта и локальных объемных изменений в матричной структуре двухфазных систем на формирование упругих полей [13]. Приведенные выше экспериментальные значения модуля Юнга могут послужить отправной точкой для расчета эффективного модуля Юнга гетерогенных материалов с учетом объемной доли включений. Анализ приведенных результатов позволяет утверждать, что основную роль при формировании матричной структуры и физико-механических свойств гетерогенного материала на основе меди оказывает размер частиц, образующих матрицу прессовки, который определяет величину площади межчастичного контакта металлического происхождения. Присутствие в гетерогенном материале с высоким содержанием (30% объем.) твердых включений, размер частиц которых существенно превышает размер частиц матрицы ( $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$ ) приводит к снижению прочности прессовки. Последнее можно объяснить достаточно низкими значениями суммарной площади межчастичного контакта металлического происхождения, в сравнении с занимаемой площадью частиц включений большого размера, образующих механический контакт.

Увеличение соотношения размера частиц компонентов ( $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ ) приводит к снижению значений физико-механических свойств по сравнению с материалом на основе чистой меди с сопоставимым средним размером частиц (100мкм), табл.1. Показатель прочности на изгиб понижается более чем в 2 раза ( $\sigma = 23,4$  МПа и  $\sigma = 49,5$  МПа), модуль упругости уменьшается на 30% ( $E = 64$  ГПа и  $E = 98$  ГПа).

Установлено также, что уровень пористости исследованного холоднопрессованного гетерогенного материала в меньшей степени влияет на механическую прочность по сравнению с материалами на основе чистой меди. С другой стороны, присутствие в материале твердых включений вольфрама во всех исследованных композициях приводит к повышению остаточной пористости по сравнению с холоднопрессованными материалами на основе чистой меди при прочих равных условиях почти в 2 и более раз.

Комплекс проведенных в настоящей работе исследований показывает, что для неспеченных порошковых материалов гетерогенного состава  $\text{Cu} - 30\%$  (объем)  $\text{W}$  величина соотношения размеров частиц матрица/включение при фиксированном массовом соотношении компонентов в смеси влияет на ряд важных характеристик структуры прессовки, в частности на распределение и локализацию частиц включений в объеме медной матрицы. Характеристика матричной структуры гетерогенного материала порошковой прессовки оказывает влияние на физико-механические свойства материала, такие как прочность на изгиб и модуль упругости. Полученные результаты подтверждают известные представления о физической природе упрочнения материала матрицы в порошковых системах путем формирования в материале внутренних напряжений, возникающих в результате увеличения упругих деформаций [14, 15]. Исходя из результатов проведенных экспериментальных исследований даны рекомендации по формированию технологически прочных порошковых облицовок, которые способны обеспечить высокие показатели действия кумулятивного заряда.

**Выводы.** Проведенные исследования порошкового гетерогенного материала состава  $\text{Cu} - 30\%$  (объем.)  $\text{W}$  показали, что на формирование микроструктуры и ряда структурно-чувствительных физико-механических свойств неспеченных прессовок оказывает влияние размер частиц включений и величина соотношения размеров частиц компонентов смеси  $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ .

Установлен механизм формирования дефектов в структуре прессовки гетерогенного состава на основе медной матрицы, что позволило обосновать присутствие пор и включений как концентраторов накопленной деформации. Показано, что на локализацию включений вольфрама влияет их упругая деформация в процессе холодного прессования с последующим эффектом упругого последействия при снятии внешней нагрузки.

Показано, что структура гетерогенного холоднопрессованного материала  $\text{Cu}-30\%$  объем.  $\text{W}$  имеет изотропный характер вне зависимости от величины соотношения размеров частиц матрица/включение  $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ .

Установлено, что присутствие несовершенных границ не является препятствием для достижения технологической прочности неспеченных прессовок гетерогенного состава с высоким показателем физико-механических свойств материала.

Оптимальное значение прочности материала прессовок гетерогенного состава на основе меди ( $\text{Cu}-30\%$  объем.  $\text{W}$ ) можно получить при использовании в составе смеси компонентов с соотношением размеров частиц  $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$ , увеличение или уменьшение этого соотношения приводит к уменьшению показателей физико-механических свойств.

1. Сердюк Г. Г., Епифанцева Т. А., Державец Л. И. Применение порошкового материала для нефтяных и газовых скважин. // Порошковая металлургия. 1990. №4. – С. 38-42.
2. Андриевский Р. А., Спивак И. И. Прочность тугоплавких соединений материалов на их основе. – Челябинск: Металлургия, 1989.
3. Скороход В. В. Некоторые проблемы технологии получения, исследования структуры и свойств нанокристаллических материалов // Тр. Нанокристаллические материалы, Киев 1998. – С. 381-389.
4. Епифанцева Т. А., Подрезов Ю. Н., Вербило Д. Г., Каюк В. Г., Мартюхин И. Д., Сердюк Г. Г. 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.
5. 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.
6. Епифанцева Т. А. Особенности структуры и физико-механические свойства прессовок гетерогенного материала  $\text{Cu}-20\%$  мас.  $\text{w}$  в зависимости от соотношения размеров частиц компонентов смеси  $R(\text{Cu})/R(\text{W})$  // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2013. Випуск №41, Частина 1. – С. 70-75
7. Епифанцева Т. А., Мартюхин И. Д., Михайлов О. В., Сердюк Г. Г. Влияние схемы уплотнения на распределение свойств материала облицовок кумулятивных зарядов при их формовании из гетерогенной порошковой композиции. / Порошковая металлургия, 2000, N 7/8. – С. 78-83.
8. 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.
9. Порошковая металлургия материалов специального назначения. Под ред. В. И. Барка, В. Вейса (пер. с англ.). – М.: Металлургия, 1977.
10. Microanalyse et Microscopie Electronique a Balayage: Ecole d'Ete de St-Martin-d'Herès 11-16. Septembre. London. –

1978. – 406 с.
11. Балтер М. А., Любченко А. П., Аксенова С. И. и др. / Фрактография-средство диагностики разрушенных деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 157 с.
  12. Берштейн М. Л. Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник: Пер.с англ. – М.: Metallurgiya, 1982. – 488 с.
  13. Скороход В. В. Приближенные методы численной оценки модулей упругости композиционных и микронеоднородных материалов. / Порошковая металлургия, – 2011, №1/2. С. 69 – 80.
  14. 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.
  15. Штерн М. Б., Рудь В. Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ на основі порошків металів і кераміки при деформуванні та спіканні. – Луцьк, 2010. – С. 78-79.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2014.