

УДК 621.762

Т.А. Епифанцева

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕССОВОК ГЕТЕРОГЕННОГО МАТЕРИАЛА Cu-20\% W В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ $R(\text{Cu})/R(\text{W})$

Исследованы структура и некоторые свойства холоднопрессованного гетерогенного материала на основе меди с добавкой твердого компонента (W) в зависимости от соотношения размеров частиц пластичной матрицы и твердых включений. Установлены закономерности формирования структуры материала в зависимости от соотношения размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ во взаимосвязи с изменением ряда свойств: плотности, прочности, электропроводности. Проанализированы причины формирования характерных дефектов структуры, а также влияние последних на механические свойства и характер разрушения материала. Показано, что структура гетерогенного материала в неспеченном состоянии изотропна вне зависимости от соотношения размеров частиц матрица/включения. Описан характер разрушения прессовок гетерогенного материала на основе меди с добавками вольфрама в зависимости от величины соотношения частиц матрица/включения.

Ключевые слова: неспеченные прессовки, конусная форма, структура гетерогенного материала.

Табл. 1. Рис. 3. Лит. 12.

Т.О. Єпифанцева

Особенности структуры і фізико-механічні властивості пресовок гетерогенного матеріалу $\text{Cu} - 20\%.\text{W}$ залежно від співвідношення розмірів часток компонентів суміші $(\text{Cu}) / R (\text{W})$

Досліджено структуру і деякі властивості гетерогенного холоднопресованого матеріалу на основі міді з додаванням твердого компонента (W) залежно від розміру частинки пластичної матриці і твердих частинок. Встановлено закономірності формування структури матеріалу в залежності від співвідношення розмірів часток $R (\text{Cu}) / R (\text{W})$ у взаємозв'язку зі зміною деяких властивостей: щільність, міцність, електропровідність. Проаналізовано причини утворення дефектів у структурі, а також їх впливу на механічні властивості і характер руйнування матеріалу. Показано, що структура гетерогенного матеріалу у неспеченому стані ізотропна незалежно від співвідношення розмірів часток матриці і включень. Досліджено характер руйнування пресовок гетерогенного матеріалу на основі міді з домішками вольфраму залежно від значення співвідношення розмірів часток матриць/включень.

Ключові слова: неспечені пресовки, конусна форма, структура гетерогенного матеріалу.

T. Epifantseva

Specific features of structure and physical and mechanical properties of $\text{Cu} - 20\%.\text{W}$ heterogeneous material depending on the ratio of mixture components particle size $R (\text{Cu})/R (\text{W})$

Interrelation between the structure and some properties of a cold-pressed heterogeneous material with a copper matrix and 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, strength, electrical conductivity) formation depending on particle size ratio $R (\text{Cu})/R (\text{W})$ 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 $R (\text{Cu})/R (\text{W})$. Mechanisms of the heterogeneous material Cu-20wt.\%W failure are discussed in interrelation with the matrix/inclusion particle size ratio.

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

Постановка проблеми. Использование уникальных свойств композиционных порошковых материалов в сфере высоких скоростей (2000- 6000 м/сек), давлений (~1000 МПа) и температур (более 1000 °С), требует создания материалов с особыми свойствами. Так, повышение эффекта проникновения кумулятивной струи невозможно без создания облицовок определенной структуры (рис.1), которая обеспечит необходимые характеристики материала для запреградного действия [1].



Рис. 1. Облицовка кумулятивного заряда из порошкового гетерогенного материала на основе меди

Создание облицовок с требуемым комплексом свойств достигается путем выбора состава и метода формования с образованием определенной структуры материала [2]. Создание технологически прочных пористых изделий из композиционного материала на основе меди, содержащего в составе смеси компонент тяжелой тугоплавкой фазы, представляет практический интерес для повышения кумулятивного эффекта. Использование в составе смеси включений тяжелого компонента, в нашем случае W, в количестве 20% масс, имело целью повышение комплекса специальных служебных свойств в момент детонационного воздействия, что должно быть обеспечено высокой прочностью вольфрама ($\sigma_p = 120 \text{ кг/мм}^2$), 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 [3, 4, 5].

Цель настоящей работы – изучить особенности микроструктуры неспеченных прессовок из порошкового гетерогенного материала на основе меди и тяжелой фазы вольфрама в зависимости от соотношения размера частиц компонентов смеси. Установить влияние величины соотношения размеров частиц матрица - включения на плотность и микроструктуру материала прессовки.

Пористые изделия из гетерогенного порошкового материала на основе меди для практического применения должны обладать достаточной технологической прочностью. В связи с этим целесообразно изучить особенности формования пористой структуры материала прессовки и ее роль в формировании физико-механических свойств изделий.

Объекты исследований и методики испытаний. В настоящей работе исследовались образцы состава Cu – 20% (масс.) W, с фиксированным содержанием тяжелой фазы вольфрама в смеси, изготовленные по одной технологической схеме формования до максимальной плотности. Из исходных частиц компонентов методом механического перемешивания были подготовлены гетерогенные порошковые смеси, которые различаются соотношением размера частиц матрица/включение (табл. 1). В состав шихт входил порошок распыленной меди со средним значением размера частиц 40 мкм, и вольфрама со средним значением размера частиц 10 мкм и 100 мкм. 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, полученные в идентичных условиях. Смесь уплотняли двухсторонним прессованием до предельной плотности, которой соответствует некоторое критическое давление, при превышении которого наблюдается расслой прессовок после их выпрессовки из пресс-формы. 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 мм³ определяли расчетным методом по ГОСТ 18898-89, таблице.

Таблица 1. Зависимость физико-механических свойств гетерогенного материала на основе меди от соотношения размеров частиц компонентов смеси R(Cu)/R(W)

Размер частиц Cu, мкм	Отн. плотность %	R(Cu) / R(W)	Модуль упруг. E, ГПа	Прочность на изгиб, МПа	Удельное Электро-сопротивление мк Ом м
40	93,5	-	98	49,5	0,0182
40	88,3	4	90	62,6	0,1747
40	92,7	0,4	94	44,4	0,8733

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 изделия, в объеме прессовок, а также морфологию структуры и ее взаимосвязь с содержанием и размером частиц вольфрама в смеси [6]. Фрактограммы исследованных холоднопрессованных материалов представлены на рис. 2 и рис. 3. 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 [7 - 9]. Электропроводность материала измеряли при комнатной температуре с помощью моста постоянного тока Р30009 (погрешность измерений составляла не более 5%) [10].

Результаты исследований и их обсуждение. Фрактографический анализ поверхностей разрушения неспеченных прессовок выявил существенные различия в характере разрушения гетерогенного материала одного состава 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. При прессовании, присутствие крупных частиц вольфрама в составе смеси приводит к повышению степени деформации материала в целом и, как следствие, в результате пластической деформации происходит изменение формы частиц и создание контакта.

Для структуры прессовок из гетерогенной порошковой смеси с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$ характерно присутствие мелких трещин (рис. 2).

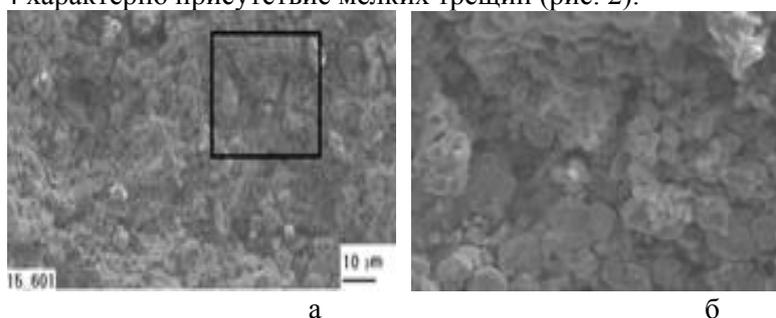


Рис. 2. Фрактограммы прессовки гетерогенного состава Cu-20%мас.W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$, а, б – выделенный фрагмент фрактограммы, где присутствуют мелкие трещины.

Причиной их образования по мнению авторов является упругое последствие, возникающее при выпрессовке. При соотношении размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$ для структуры характерно присутствие трещин расслоения, образующихся под действием сдвиговых деформаций (рис. 3).

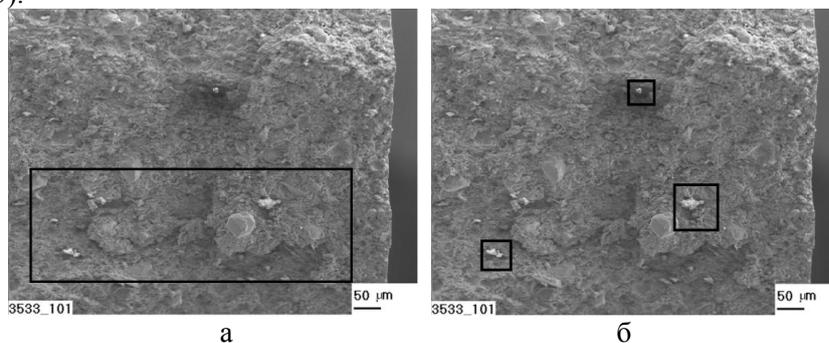


Рис. 3. Фрактограммы прессовки гетерогенного состава Cu-20%мас.W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$; выделенный фрагмент с трещинами расслоения; а, б – выделенный фрагмент фрактограммы с частицами вольфрама внутри пор.

Частицы вольфрама фиксируются в вязкой медной матрице. Ввиду большой разницы величин удельного веса порошка вольфрама ($19,26\text{г}/\text{см}^3$) и удельного веса порошка электролитической меди ($8,96\text{ г}/\text{см}^3$) в процессе засыпки в пресс-форму до известной степени может нарушаться гомогенность исходных смесей, тяжелые частицы вольфрама неравномерно распределяются в структуре холоднопрессованного материала, рис. 2, а.

Наличие пор, свободных от частиц вольфрама, а также локальное нарушение гомогенности в виде скоплений частиц вольфрама в медной матрице (данные фрактографического анализа, рис. 6, в) могут свидетельствовать о: роли величины удельной плотности материала вводимых в материал твердых включений на частичное нарушение гомогенности исходной порошковой смеси при засыпке в прессформу; влиянии физико-химического состояния поверхности частиц включений,

обладающих высокой жесткостью и отсутствием текучести (например, вольфрам), на их локализацию в объеме вязкой матрицы матрицы (например, меди).

Структура материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$, 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 медного каркаса присутствие частиц вольфрама не наблюдалось (рис. 2, б). Для данного материала также характерно присутствие мелких трещин, хотя в целом структура может рассматриваться как изотропная, а на модуль упругости холоднопрессованного материала присутствие таких трещин существенного влияния по всей видимости не оказывает. Последнее по нашему мнению свидетельствует о преимущественной роли размера частиц матрицы, который определяют величину площади единичного межчастичного контакта. В структуре материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$ при введении крупных частиц вольфрама (100 мкм) наиболее часто наблюдается присутствие последних в порах медной матрицы. По нашему мнению пора в пластичной медной матрице формируется вокруг твердых частиц вольфрама, имеющих также высокую упругость, за счет сил упругой деформации твердых частиц вольфрама в процессе формирования плотной прессовки при снятии с материала внешней нагрузки (рис. 3).

Фрактографические исследования структуры материала прессовок одного состава с разным соотношением размера частиц матрица/включение позволило выявить особенности расположения частиц включений в объеме пластичной медной матрицы. Показано, что характер формирующейся микроструктуры прессовок исследуемого гетерогенного материала зависит от размера частиц включений и 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 $R(\text{Cu})/R(\text{W})$.

Для исследования границ между частицами медной матрицы и включений вольфрама был проведен микрорентгеноспектральный анализ с фотографической регистрацией интерференционных линий в характеристических излучениях K_{α} Cu и L_{α} W. Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил отсутствие формирования зоны контакта между частицами меди и вольфрама, что по нашему мнению может быть результатом действия упругих сил в материале, в котором присутствуют частицы вольфрама больших размеров (100 мкм). Можно предположить, что формирование в структуре материала межчастичных контактов с разным типом связи (металлической и механической) понижает прочностные и упругие свойства данного материала по сравнению с другими исследованными композициями с другим соотношением размеров частиц компонентов и, как следствие, такой материал имеет самые низкие показатели модуля упругости и прочности при изгибе (таблица).

Проведенные в работе измерения электросопротивления холоднопрессованных гетерогенных материалов с различными значениями соотношения размеров частиц компонентов $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ показали, что как и в случае холоднопрессованных материалов на основе чистой меди значения удельного электросопротивления коррелируют со значениями модуля упругости. Так, максимальное значение удельного электросопротивления зафиксировано для композиции с $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$, который также обладает самым высоким модулем упругости. Это может быть объяснено уменьшением количества межчастичных контактов меди при одновременном увеличении площади единичного межчастичного контакта вольфрам-вольфрам. Такая закономерность может привести к повышению удельного сопротивления при одновременном повышении модуля упругости материала. Однако, при этом сплошность медной матрицы должна нарушаться, что подтверждается снижением прочности данного материала при изгибе. Увеличение электросопротивления может также объясняться достаточно большим количеством микротрещин в прессовках данного состава, что также приводит к нарушению сплошности медной матрицы. Специально следует отметить, что вышеприведенные утверждения носят предварительный характер и нуждаются в дополнительной проверке экспериментальным путем, что планируется осуществить при последующих исследованиях.

Установлено, что несмотря на более высокую пористость и большую разницу размера частиц матрицы и включений, неспеченные прессовки состава Cu - 20% W имеют в 1,5 раза более высокую сырую прочность на изгиб по сравнению с показателем для чистой меди, при относительно одинаковом значении свойств модуля упругости. Присутствие в гетерогенной смеси частиц вольфрама большого размера относительно частиц меди составляющих матрицу

прессовки, например, $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$, способствует формированию значения модуля упругости на уровне показателя для чистой меди, $E = 94$ ГПа и $E = 98$ ГПа.

При этом модуль упругости гетерогенного материала остается в пределах значений, полученных для прессовок из чистой меди, что свидетельствует о незначительном влиянии межчастичного контакта механического происхождения на модуль упругости (табл. 1). Установлено также, что уровень пористости исследованного холоднопрессованного гетерогенного материала в меньшей степени влияет на механическую прочность по сравнению с холоднопрессованными 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. Комплекс проведенных в настоящей работе исследований показывает, что для холоднопрессованных материалов $\text{Cu} - 20\%$ (масс.) W величина соотношения размеров частиц матрица/включение при фиксированном массовом соотношении компонентов в смеси влияет на ряд важных характеристик структуры гетерогенного материала, в частности на распределение и локализацию частиц тяжелого включения в объеме медной матрицы, что в свою очередь оказывает влияние на структурно-чувствительные физико-механические свойства холоднопрессованного материала. Полученные результаты не противоречат известным представлениям о физической природе упрочнения, а именно с деформационным упрочнением материала под действием формирующихся в материале внутренних напряжений, возникающих в результате увеличения деформации материала при его холодном прессовании [11,12].

Выводы. Проведенные комплексные исследования холоднопрессованных материалов $\text{Cu} - 20\%$ (масс.) W показали, что определяющее влияние на формирование их микроструктуры и ряда структурно-чувствительных физико-механических свойств оказывает величина соотношения размеров частиц матрица/включение $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ при фиксированном содержании вольфрама.

Микроструктурные, в том числе и фрактографические исследования, позволили выявить специфический механизм формирования определенной части пористости. А именно, часть пор внутри медной матрицы, внутри которых находятся частицы вольфрама, формируются в результате упругой деформации последних в процессе холодного прессования с последующим эффектом упругой последействия при снятии внешней нагрузки с материала.

Показано, что структура гетерогенного холоднопрессованного материала $\text{Cu}-20\%$ мас. W имеет изотропный характер в не зависимости от величины соотношения размеров частиц матрица/включение $R(\text{Cu})/R(\text{W})$, а увеличение этого соотношения приводит к увеличению прочности материала. Величина модуля упругости коррелирует с величиной удельного электросопотввления материала.

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. 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
3. 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.
4. 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.
5. Порошковая металлургия материалов специального назначения. Под ред. Барка В. И Вейса В. (пер. с англ.). – М.: Металлургия, 1977.
6. 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
7. Microanalyse et Microscopie Electronique a Balayage: London. – 1978. – 406 с.
8. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. и др./ Фрактография-средство диагностики разрушенных деталей.- М.: Машиностроение, 1987. – 157с.
9. Берштейн М.Л. Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник: Пер.с англ. – М.:Металлургия, 1982. – 488 с.
10. Затовский В.Г., Минакова Р.В., Варченко В.Т., Копылова Г.Е., Головкова М.Е. Исследование триботехнических и электроконтактных свойств легированной молибденом оловянистой бронзы // Электрические контакты и электроды. – 2008, С. 138-150
11. 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.
12. 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.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.