

Влияние соотношения размеров частиц компонентов смеси на структуру и свойства прессовок гетерогенного материала Cu—20\% (мас.) W

Т. А. Епифанцева, А. Ю. Коваль, В. В. Скороход, М. Б. Штерн

Изучены процессы формирования порошковых медно-вольфрамовых композиций для получения оптимальных с точки зрения практического применения физико-механических свойств неспеченных прессовок. Выявлено влияние соотношения размеров частиц матрица/включение $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ при фиксированном содержании вольфрама в смеси на структуру и физико-механические свойства холоднопрессованных материалов Cu—20\% (мас.) W . Фрактографические исследования позволили установить характерный для данной композиции механизм формирования пористости, где часть пор внутри медной матрицы образуется в результате упругой деформации вольфрамовых частиц в процессе холодного прессования. Показано, что структура гетерогенного холоднопрессованного материала Cu—20\% (мас.) W имеет изотропный характер вне зависимости от величины соотношения размеров частиц матрица/включение $R(\text{Cu})/R(\text{W})$. С увеличением значения этого соотношения прочность материала увеличивается. Величина модуля упругости коррелирует с величиной удельного электросопротивления материала. Рекомендуемое соотношение размеров частиц матрица/включение в исследованном гетерогенном материале составляет $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$, что позволит увеличить эффективность применения изделий при действии кумулятивного заряда.

Ключевые слова: гетерогенный материал, неспеченная прессовка, прочность, структура, пластическая матрица.

Введение

Использование уникальных свойств композиционных порошковых материалов в сфере высоких скоростей (2000—6000 м/с), давлений (~1000 МПа) и температур (более 1000 °С) требует создания материалов с особыми свойствами. Так, повышение эффекта проникновения кумулятивной струи невозможно без создания комплектов зарядов определенной структуры, которая обеспечит необходимые характеристики материала для запреградного действия [1]. Получение комплектов зарядов с требуемыми свойствами достигается выбором состава и метода формирования с образованием определенной структуры материала [2]. Создание технологически прочных пористых изделий из композиционного материала на медной основе, содержащего компонент тяжелой тугоплавкой фазы (в нашем случае W в количестве 20% (мас.)), представляет практический интерес для повышения кумулятивного эффекта, комплекса специальных служебных свойств неспеченных изделий на основе пластичной матрицы в момент детонационного воздействия благодаря высокой прочности вольфрама (ТС-5М, $\sigma_p = 1200$ МПа), его большой плотности (19,3 г/см³) и достаточному запасу пластичности (относительное удлинение — 10%). Сочетание таких показателей прочности и пластичности позволит создать гетерогенный композиционный материал высокой эффективности [3—5].

© Т. А. Епифанцева, А. Ю. Коваль, М. Б. Штерн, 2012

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 в 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 формирования пористой структуры материала прессовки и оценить ее роль в формировании физико-механических свойств изделий.

Объекты исследований и методики испытаний

В настоящей работе исследовали образцы Cu—20% (мас.) W с фиксированным содержанием тяжелой фазы (вольфрама), изготовленные по одной технологической схеме формования до получения максимальной плотности. Из исходных частиц компонентов механическим перемешиванием готовили гетерогенные порошковые смеси, которые различались соотношением размеров частиц матрица/включение (таблица). В состав шихт входил порошок распыленной меди со средним размером частиц 40—100 мкм и вольфрама со средним размером частиц 10—100 мкм. С целью определения влияния 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) на прессе П-483. Плотность пористых прямоугольных образцов размером 4,36x6,3x43,6 мм³ рассчитывали по ГОСТ 18898-89 (таблица).

Анализ структуры материала и микромеханизма разрушения поверхности неспеченных прессовок проводили с помощью сканирующего

Зависимость физико-механических свойств гетерогенного материала на основе меди от соотношения размеров частиц компонентов смеси $R(\text{Cu})/R(\text{W})$

Размер частиц Cu, мкм	Относительная плотность, %	$R(\text{Cu}) / R(\text{W})$	Модуль упругости E , ГПа	Прочность при изгибе, МПа	Удельное электро-сопротивление, мкОм·м
40	93,5	—	98	49,5	0,0182
100	96,8	—	84	45	0,0173
40	88,3	4	90	62,6	0,1747
40	92,7	0,4	94	44,4	0,8733
100	90,7	10	87	69,6	0,1259
100	91,8	1	65	45,3	0,1516

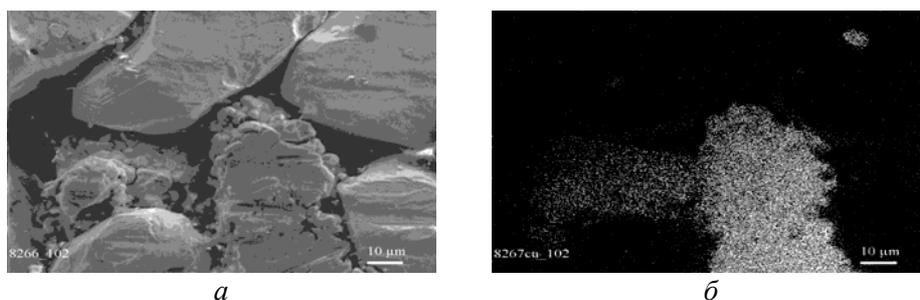


Рис. 1. Структура прессовки гетерогенного материала состава Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$ (а); изображение частиц вольфрама, полученное в характеристическом излучении $W L_{\alpha}$ (б).

электронного микроскопа (СЭМ) 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]. Наиболее характерные фрактограммы исследованных холоднопрессованных материалов представлены на рис. 1—6. Фрактографический анализ позволил выявить роль изменения соотношения размера включений твердого компонента (W) относительно размера частиц материала матрицы (Cu) на основные механические свойства неспеченных прессовок. Микроструктуру прессовок оценивали 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%).

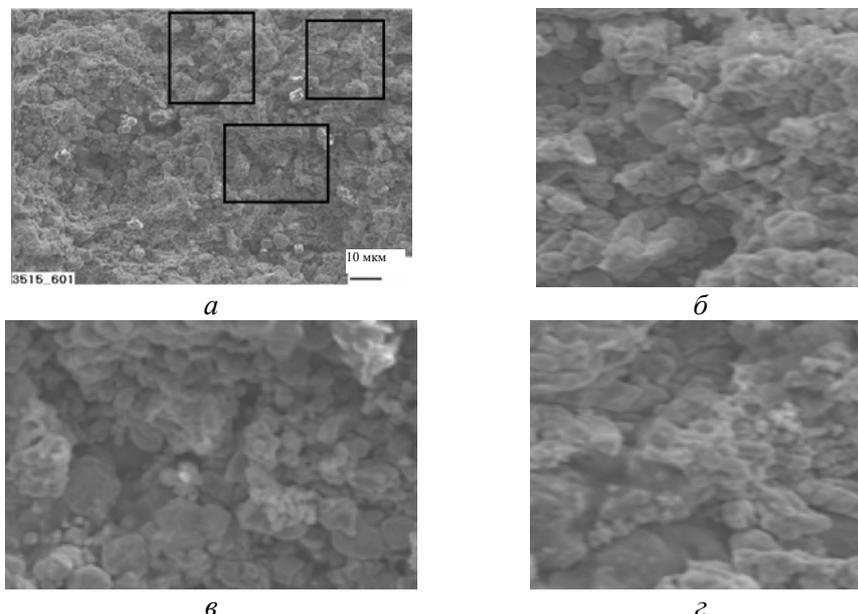


Рис. 2. Фрактограммы прессовки гетерогенного состава Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$ (а), б—г — выделенные фрагменты фрактограммы, где присутствуют мелкие трещины.

Результаты исследований и их обсуждение

Фрактографический анализ поверхностей разрушения неспеченных прессовок выявил существенные различия в характере разрушения гетерогенного материала одного состава в зависимости от соотношения размеров 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 площадь 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 вольфрама от округлой, практически равноосной, до вытянутой, близкой к овальной (рис. 1).

При прессовании порошковой композиции с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$ напряженно-деформированное состояние уплотняемой смеси по сравнению с другими композициями усиливается, площадь единичного межчастичного контакта медь—вольфрам возрастает, ухудшается степень уплотнения и в результате прочность и модуль упругости материала снижаются (таблица).

Для структуры прессовок из гетерогенной порошковой смеси с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$ характерно присутствие мелких трещин (рис. 2). Причиной их образования, по мнению авторов, является упругое последствие, возникающее при выпрессовке. При соотношении размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$ в структуре имеются трещины расслоения, образующиеся в результате сдвиговых деформаций (рис. 3).

Анализ фрактограмм прессовок с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ показал, что поверхность разрушения материала имеет хрупко-вязкий излом (рис. 4). На поверхности излома видны недеформированные частицы меди, что обуславливает хрупкий межчастичный излом. Образование микротрещин по межзерненным границам частиц меди свидетельствует о хрупком разрушении этих частиц. При приложении внешних нагрузок отрыв медных частиц происходит в местах расположения

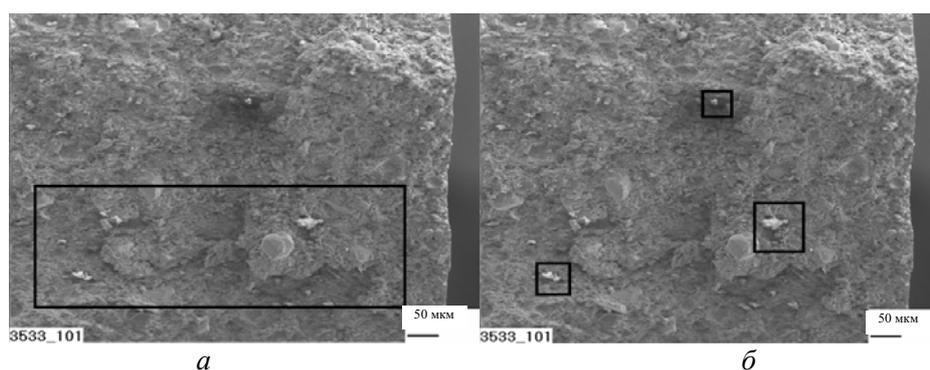


Рис. 3. Фрактограммы прессовки гетерогенного состава Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$, выделены фрагменты с трещинами расслоения (а) и с частицами вольфрама внутри пор (б).

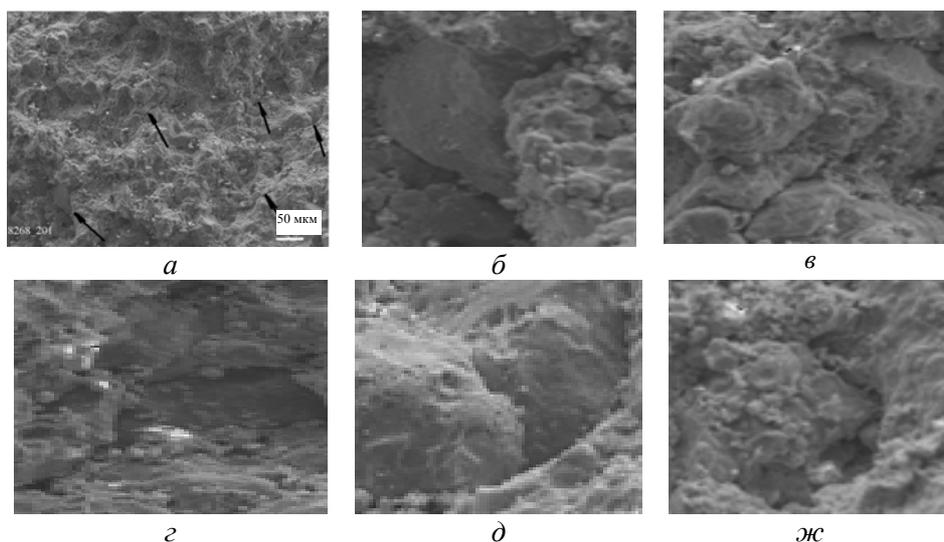


Рис. 4. Фрактограмма прессовки гетерогенного материала Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ (участок образца со стороны, противоположной приложению нагрузки) (а); б—ж — фрагменты фрактограмм с характерными дефектами, расположенными в направлении стрелки (а).

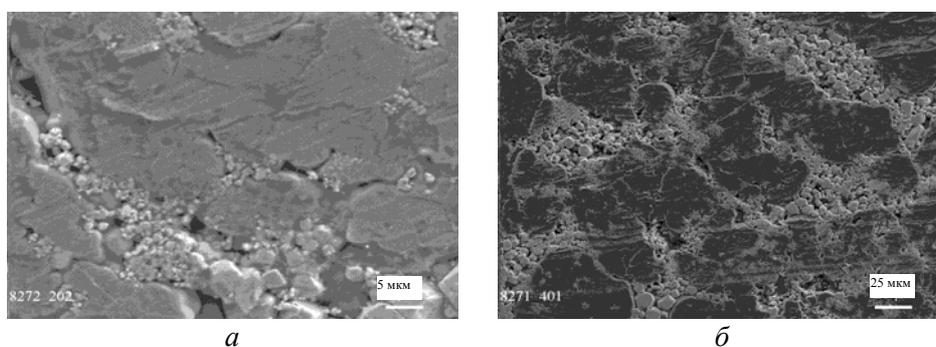


Рис. 5. Структура гетерогенного материала Cu—20% (мас.) W при соотношении размеров частиц компонентов в смеси $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$, изображения получены во вторичных электронах (а) и в $\text{CuK}\alpha$ -излучении (б).

пор, что способствует дальнейшему распространению трещин по межчастичным границам (рис. 5). При изучении микроструктуры прессовки в отраженном излучении (режим “сompo”) при увеличении $\times 400$ установлена неравномерность распределения вольфрама в объеме прессовки (рис. 5, а).

Анализ поверхности излома прессовок (рис. 4) позволяет утверждать, что разрушение имеет как хрупкий характер (межчастичное разрушение по границам частиц меди), так и вязкий (межзеренное разрушение). При этом хрупкий излом характерен для частиц меди, находящихся в непосредственном контакте с частицей вольфрама (рис. 4). Частицы вольфрама располагаются как внутри пор, имеющих в материале (рис. 4, ж), так и непосредственно между частицами меди (рис. 2, з). Фрактограммы прессовок свидетельствуют также о наличии межчастичных трещин, распространяющихся от поры вглубь прессовки (рис. 4, б—г). Исследования структуры поверхности прессовок гетерогенного состава показали, что частицы включений вольфрама формируют агломераты плоской формы, которые неравномерно расположены в медной матрице.

Вязкий характер разрушения прессовок гетерогенного материала на основе пластичной матрицы подтверждается фрактограммами с характерным так называемым чашечным изломом (рис. 4).

Использование включений вольфрама малого размера при соотношении размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ приводит к повышению упрочнения прессовки, поскольку разрушение материала при этом происходит в основном по пластичной матрице. Аналогичная закономерность наблюдается для композиционного материала на основе меди, разработанного для электрических контактов [10]. В этой работе установлен рост электросопротивления и твердости материала с увеличением содержания включений в смеси при сопоставимых показателях плотности.

Установлено, что при уплотнении исходных смесей холодным прессованием разрушения частиц вольфрама под действием формирующихся в материале напряжений не происходит, что объясняется их высокой прочностью. В то же время наблюдается изменение формы частиц W в зависимости от величины соотношения размеров частиц компонентов смеси (см. рис. 1).

Наиболее характерной особенностью структуры прессовок материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ являются “незаполненные” поры, то есть не содержащие включений в виде частиц вольфрама. При этом частицы вольфрама располагаются непосредственно между частицами меди, формирующими пластичную матрицу. Иногда частицы вольфрама расположены вблизи пор (рис. 6.)

Фрактографический анализ материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ показал, что характерным для структуры в этом случае является формирование мелких пор и практически равномерное распределение частиц вольфрама в медной матрице (рис. 6). Отсутствие внутри пор частиц вольфрама в структуре данного холоднопрессованного материала может быть объяснено прохождением процесса межчастичного проскальзывания, обусловленного действием тангенциальных напряжений при приложении усилия прессования к материалу гетерогенного состава. При этом частицы вольфрама фиксируются в вязкой медной матрице. Ввиду большой разницы плотностей порошков вольфрама ($19,26 \text{ г/см}^3$) и электролитической меди

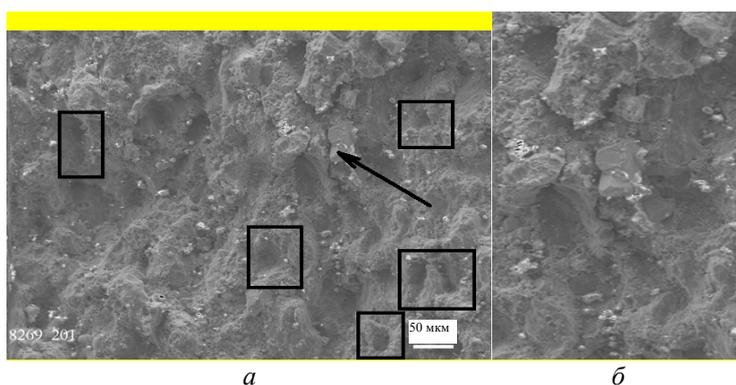


Рис. 6. Фрактограмма прессовки гетерогенного материала Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ (участок образца со стороны приложения нагрузки) (а); фрагмент фрактограммы (на рис. 6. а обозначен стрелкой) с характерными дефектами, способствующими распространению трещины (б).

(8,96 г/см³) в процессе засыпки в пресс-форму до известной степени может нарушаться однородность исходных смесей, а тяжелые частицы вольфрама в результате будут неравномерно распределяться в структуре холоднопрессованного материала (рис. 2, б). Последнее предположение авторов носит предварительный характер и требует дальнейшей проверки экспериментальным путем. Наличие пор, свободных от частиц вольфрама, а также локальное нарушение однородности в виде скоплений частиц вольфрама в медной матрице (рис. 6, б) могут свидетельствовать о влиянии удельной плотности материала вводимых твердых включений на частичное нарушение однородности исходной порошковой смеси при засыпке в пресс-форму и физико-химического состояния поверхности частиц включений, обладающих высокой жесткостью и отсутствием текучести (например, вольфрам), на их локализацию в объеме вязкой матрицы (например, меди).

Для структуры материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 4$, где размер частиц вольфрама составляет 10 мкм, характерно, что частицы вольфрама располагаются как в межчастичном пространстве, так и на поверхности частиц меди. При этом в порах медного каркаса присутствия частиц вольфрама не наблюдается (см. рис. 2, б). В данном материале также присутствуют мелкие трещины, хотя в целом структура может рассматриваться как изотропная, а на модуль упругости холоднопрессованного материала такие трещины существенного влияния, по всей видимости, не оказывают. Последнее, по нашему мнению, свидетельствует о преимущественной роли размера частиц матрицы, который определяет 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 образования плотной прессовки при снятии с материала внешней нагрузки (см. рис. 3). Следует отметить, что в структуре материала с соотношением $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$, в который также вводились крупные частицы вольфрама (100 мкм), последние располагаются как внутри некоторой части пор, так и непосредственно внедрены в медную матрицу, то есть расположены вне пор (см. рис. 1).

Фрактографические исследования структуры материала прессовок одного состава с разным соотношением размера частиц матрица/включение позволили выявить особенности расположения частиц включений в объеме пластичной медной матрицы. Формирующаяся микроструктура прессовок исследуемого гетерогенного материала зависит от размера частиц включений, она изотропна для всех значений соотношения $R(\text{Cu})/R(\text{W})$. На структуру также влияет величина соотношения размеров частиц матрица/включение и она может до определенной степени варьироваться. Это позволяет утверждать, что характер разрушения гетерогенного материала также имеет заметные различия для каждой величины соотношения $R(\text{Cu})/R(\text{W})$. Характерной особенностью структуры прессовок с высоким соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ ввиду малого размера частиц вольфрама, высокой

прочности и жесткости последних, а также присутствия на поверхности частиц стабильной, твердой оксидной пленки, покрывающей их поверхность, и существенной разницы плотности порошка, приводящей к локальным нарушениям гомогенности исходной смеси, является образование агломератов (рис. 5). Предположительно, образование последних происходит под действием ван-дер-ваальсовых сил, возникающих между частицами вольфрама, в том числе и в процессе засыпки исходной смеси в пресс-форму, когда может локально нарушаться гомогенность последней. Присутствие агломератов частиц вольфрама наблюдалось по всей поверхности излома исследованных образцов. Более того, на отдельных участках поверхности прессовок микроскопические исследования выявили “поля” агломератов (рис. 5, а), однако при этом сплошность медной матрицы в целом не нарушается. Испытания на прочность материала данного состава показали, что формирование агломератов частиц вольфрама положительно влияет на прочностные свойства прессовок. Прочность σ холоднопрессованного гетерогенного материала с $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ увеличивается в среднем в 1,5 раза по сравнению с σ аналогичного материала на основе чистой меди (соответственно 69,5 и 45 МПа). Процесс разрушения такого материала сводится в основном к разрушению пластичной матрицы, которому предшествует пластическая деформация частиц меди, о чем свидетельствует ямочный характер излома (рис. 4, а и рис. 6, б). Агломераты частиц вольфрама, по нашему мнению, выступают в роли структурных элементов, препятствующих распространению магистральных трещин в процессе разрушения. Это частично подтверждается наблюдаемым в некоторых случаях микрорастрескиванием в зонах, прилегающих к агломератам частиц вольфрама, которое происходит на этапе уплотнения материала холодным прессованием.

Материал с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$ характеризуется самым высоким показателем пористости среди всех исследованных холоднопрессованных гетерогенных композиций Cu—20% (мас.) W. Уровень пористости в среднем составляет 10% (см. таблицу). Для исследования границ между частицами медной матрицы и включений вольфрама проведен микрорентгеноспектральный анализ с фотографической регистрацией интерференционных линий в характеристических излучениях $\text{Cu}K_\alpha$ и $\text{W}L_\alpha$ (см. рис. 1, а, б). Анализ подтвердил отсутствие 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). Наблюдаемое в гетерогенном материале изменение морфологии частиц меди и вольфрама (частицы в основном имеют вытянутую форму) свидетельствует о протекании пластической деформации обоих компонентов под действием нагрузки, прикладываемой при прессовании (см. рис. 1 а). В гетерогенном материале с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 1$, то есть в том случае, когда размер частиц пластичного компонента и твердых включений одинаков, образование межчастичного контакта как с механической (медь—вольфрам), так и с металлической связью (медь—медь) затруднено. Можно предположить, что формирование в структуре материала межчастичных контактов с разным типом связи понижает его прочностные и упругие свойства по сравнению с исследованными компози-

циями 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 соотношениями 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 удельное электросопротивление зафиксировано для композиции с $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 0,4$, которая также обладает самым высоким модулем упругости. Это можно объяснить влиянием суммарной площади межчастичного контакта меди при одновременном увеличении площади единичного межчастичного контакта вольфрама. Такая закономерность может привести к повышению удельного сопротивления при одновременном увеличении модуля упругости материала. Однако при этом сплошность медной матрицы должна нарушаться, что подтверждается снижением прочности данного материала при изгибе. Увеличение электросопротивления можно также объяснить достаточно большим количеством микротрещин в прессовках данного состава, что также приводит к нарушению сплошности медной матрицы. Необходимо заметить, что приведенные утверждения носят предварительный характер и нуждаются в дополнительной проверке экспериментальным путем, которую планируется осуществить при последующих исследованиях.

Исследуемый в настоящей работе холоднопрессованный гетерогенный материал с пластичной матрицей с точки зрения взаимосвязи микроструктуры и комплекса физико-механических свойств может рассматриваться как пример системы промежуточного типа между статистическими и матричными системами [2]. Для таких систем вводится понятие “степень матричности”, то есть доля матричной смеси в общей случайной системе — g_m . Эту величину можно определить из измеренных значений проводимости (либо какого-либо иного полевого свойства) при сопоставлении расчетных данных для статистической и матричной систем [11]:

$$g_m = \frac{\lambda_{\text{СТ}}^{1/3} - \lambda_{\text{ИЗМ}}^{1/3}}{\lambda_{\text{СТ}}^{1/3} - \lambda_{\text{М}}^{1/3}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{СТ}}$, $\lambda_{\text{М}}$ и $\lambda_{\text{ИЗМ}}$ — соответственно расчетные значения проводимости для статистической и матричной смесей, а также измеренное значение.

В то же время параметр g_m может быть найден при стереологическом анализе микроструктуры с помощью следующих простых соотношений. Если S_1 — полная поверхность включений первой фазы, то площадь межфазной поверхности раздела в матричной системе

$$S_{12}^{\text{М}} = S_1 = \frac{A}{L_1} \theta_1, \quad (2)$$

где A — коэффициент формы включений, $A = 3—6$; L_1 — линейный размер включений. Для статистической системы

$$S_{12}^{\text{СТ}} = S_1 \cdot \theta_2, \quad (3)$$

так как вероятность контакта первой фазы со второй в этом случае пропорциональна объемной доле второй фазы.

Таким образом, если измеренная площадь межфазной поверхности находится в интервале между значениями, определяемыми по (2) и (3), то

$$g_m = \frac{S_{12}^{\text{изм}} \frac{L_1}{A} - \theta_1 \theta_2}{\theta_1(1 - \theta_2)}. \quad (4)$$

Возможность определить такой важный структурный параметр, как степень матричности композита, на основании простых измерений свойств типа проводимости, не прибегая к громоздкому стереологическому анализу, весьма привлекательна для оперативного и массового контроля структуры в процессе получения материала. Непосредственное применение описанного подхода к изучению холоднопрессованного материала Cu—20% (мас.) W, а также других гетерогенных композиций, представляющих интерес для изготовления тонкостенных облицовок кумулятивных зарядов, будет исследовано и опубликовано авторами в последующих работах.

Следует также заметить, что формирование механического контакта между частицами вольфрама или вольфрама и меди не способствует повышению модуля упругости гетерогенного материала. По сравнению с прессовками из чистой меди гетерогенный материал с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ обладает повышенной (в 1,5 раза) прочностью, как уже указывалось, за счет образования агломератов твердых частиц вольфрама, выступающих в роли упрочняющих элементов структуры, а также за счет накопленной в материале деформации и связанных с ней внутренних напряжений. При этом модуль упругости гетерогенного материала остается в пределах значений, полученных для прессовок из чистой меди, что свидетельствует о незначительном влиянии на него межчастичного контакта механического происхождения (таблица). 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. В то же время 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. Так, прессовки из чистой меди с размером частиц 100 мкм при максимальном уплотнении (до разрушения) имеют пористость около 3,2%, тогда как пористость прессовок гетерогенного материала с соотношением размеров частиц $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ при тех же условиях составляет около 9,3%.

Комплекс проведенных в настоящей работе исследований показывает, что для холоднопрессованных материалов Cu—20% (мас.) W величина соотношения размеров частиц матрица/включение при фиксированном массовом соотношении компонентов в смеси влияет на ряд важных характеристик структуры, в частности на распределение и локализацию частиц тяжелых включений 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 о деформационном упрочнении материала под действием

формирующихся в нем внутренних напряжений, возникающих в результате увеличения деформации материала при его холодном прессовании [12].

Выводы

Проведенные комплексные исследования холоднопрессованных материалов Cu—20% (мас.) 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 пор. А именно, часть пор в медной матрице, внутри которых находятся частицы вольфрама, формируются в результате упругой деформации последних в процессе холодного прессования с последующим эффектом упругого последействия при снятии внешней нагрузки с материала.

Наличие крупных незаполненных пор в структуре материала состава Cu—20% (мас.) W при $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ является существенным фактором, который следует учитывать при создании материалов с заданными свойствами и изучении их поведения при спекании.

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

Рекомендуемое соотношение размеров частиц матрица/включение в исследованном гетерогенном материале составляет $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$, что позволит увеличить эффективность применения изделий при действии кумулятивного заряда.

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. Скорород В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Там же. — 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 // Там же. — 2000. — № 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. — К.: Мин. маш., 1989. — С. 53—56.
5. Порошковая металлургия материалов специального назначения / Под ред. В. Барка и В. Вейса (пер. с англ.). — М.: Металлургия, 1977.
6. Епифанцева Т. А., Подрезов Ю. Н., Вербило Д. Г. и др. 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*: Ecole d'Été de St-Martin-d'Herès 11—16. Septembre, London, 1978. — 406 p.
8. Балтер М. А., Любченко А. П., Аксенова С. И. и др. Фрактография — средство диагностики разрушенных деталей. — М.: Машиностроение, 1987. — 157 с.
9. Берштейн М. Л. Фрактография и атлас фрактограмм: (Справ.) / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1982. — 488 с.

10. *Затовский В. Г., Минакова Р. В., Варченко В. Т. и др.* Исследование триботехнических и электроконтактных свойств легированной молибденом оловянистой бронзы // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2008. — С. 138—150.
11. *Скороход В. В.* Методы расчета физических свойств двухфазных спеченных сплавов с учетом их структуры // Тр. IV Международ. конф. по порошковой металлургии. — Карловы Вары, 1970. — С. 29—41.
12. *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 (230 с.).

Вплив співвідношення розміру частинок компонентів суміші на структуру гетерогенного матеріалу Cu—20% (мас.) W

Т. О. Єпіфанцева, О. Ю. Коваль, В. В. Скороход, М. Б. Штерн

Вивчено процеси формування порошкових композицій мідь—вольфрам для одержання оптимальних з точки зору практичного використання фізико-механічних властивостей неспечених пресовок. Виявлено вплив співвідношення розмірів частинок матриця/вкраплення $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ при фіксованому вмісті вольфраму у суміші на структуру та фізико-механічні властивості холоднопресованих матеріалів Cu—20% (мас.) W. Фрактографічні дослідження дозволили встановити характерний для даної композиції механізм формування пористості, при якому певна частина пор утворюється за рахунок пружної деформації частинок вольфраму в процесі холодного пресування. Показано, що структура гетерогенного холоднопресованого матеріалу Cu—20% (мас.) W має ізотропний характер незалежно від значень співвідношення розмірів частинок матриця/вкраплення $R(\text{Cu})/R(\text{W})$, при чому міцність матеріалу із зростанням цього співвідношення збільшується. Значення модуля пружності корелюють із величиною питомого електроопору. Рекомендоване співвідношення розмірів частинок матриця/вкраплення в досліджених гетерогенних матеріалах складає $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$, що дозволяє збільшити ефективність використання виробів у якості елементів кумулятивного заряду.

Ключові слова: гетерогенний матеріал, неспечена пресовка, міцність, структура, пластична матриця.

Influence of powder mixture components particle size ratio on cold-pressed Cu—20% (wt) W materials structure

T. A. Epifanceva, A. Yu. Koval, V. V. Skorohod, M. B. Shtern

Processes of structure formation of copper-tungsten powder compositions has been studied from the standpoint of physical-mechanical properties optimization for practical application. Influence of powder particle size ratio of matrix and inclusions components $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ at fixed tungsten content in the starting mixture on structure and physical-mechanical properties of cold-pressed Cu—20% (wt) W materials. Characteristic porosity formation mechanism for the investigated materials has been established showing that the porosity is partly formed due to tungsten particles elastic deformation during cold pressing. It has been shown that Cu—20% (wt) W cold pressed material structure is isotropic independent of $R(\text{Cu})/R(\text{W})$ ratio values. Moreover, the strength of the material with the increase of this ratio is also increasing. Elastic modulus correlates with the specific resistance of the materials. The $R(\text{Cu})/R(\text{W}) = 10$ value is recommended for the investigated cold-pressed material for the highest efficiency of its use for cumulative charge components production.

Keywords: heterogeneous material, unsintered compact, strength, structure, plastic matrix.