

Влияние температуры ударного прессования в вакууме на плотность, структуру и свойства порошковой меди

А. В. Лаптев, А. И. Толочин, Е. В. Хоменко

Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича
НАН Украины, Киев

Изучено влияние температуры уплотнения порошка меди ПМС-1 при ударном нагружении в вакууме на плотность, структуру и механические свойства образцов. Уплотняли предварительно спрессованные из порошка брикеты с относительной плотностью ~58% в диапазоне температур 25–1050 °С. Свойства определяли на вырезанных из цилиндрической прессовки прямоугольных штабиках. Для сравнения механических свойств аналогичные штабики были изготовлены из промышленной листовой меди. Установлено, что при ударном уплотнении порошковых заготовок массой 45 г с энергией 8 кДж плотность на уровне 97% достигается при комнатной температуре. Пористость образцов, спрессованных в диапазоне температур 250–450 °С, составляет 1%, при 650–750 °С — 0,2% и практически плотные образцы получают при температуре 850 °С. Максимальная прочность при растяжении 430 МПа наблюдается у образцов, уплотненных при 450 °С, и она выше прочности обычной меди, равной 340 МПа. Структура порошковых образцов с максимальной прочностью наиболее мелкозернистая, а поперечная пластическая деформация ψ этих образцов равна 40%. Образцы, уплотненные при 650 °С, имеют прочность 305 МПа и сужение 70%. Повышение температуры уплотнения до 1050 °С приводит к падению прочности до 230 МПа и увеличению пластичности ψ до 74%. Наибольшие значения твердости — 1360 МПа и предела текучести при сжатии — 550 МПа наблюдаются на образцах, спрессованных при температурах 250 и 450 °С соответственно.

Ключевые слова: медный порошок, ударное прессование, структура, свойства.

Введение

Медь является основой большого количества разнообразных композиционных материалов электротехнического назначения, где в качестве второй фазы используются тугоплавкие и твердые материалы, такие как вольфрам, молибден, хром, карбиды, нитриды, оксиды и др. [1]. Как правило, количество упрочняющей фазы не превышает по объему половины состава материала, и поэтому медная фаза является матрицей композита и от ее свойств существенным образом зависят свойства композита в целом. Одним из направлений повышения эксплуатационных свойств разных композитов, в том числе и на основе меди, является создание в материале наиболее мелкозернистой структуры. Получение такой структуры, в частности, достигается использованием пониженных температур спекания порошковых заготовок и обработки их давлением. В то же время неизученным пока остается вопрос о возможной степени снижения температуры уплотнения порошка меди, при которой обеспечивается схватывание между частицами и должный уровень прочности и пластичности. Ответ на этот вопрос представляется важным не только для чисто медных образцов, но и для медно-матричных композитов, в которых границы между медными частицами занимают еще достаточно большую долю из всех имеющихся границ.

Методика эксперимента

Для исследования влияния температуры ударного уплотнения на плотность, структуру и свойства образцов взята стандартная порошковая медь марки ПМС-1 (рис. 1). Порошок предварительно уплотняли при комнатной температуре давлением 100 МПа. Относительная плотность цилиндрических заготовок составляет 57–58% от плотности компактной меди. Полученные заготовки загружали в вакуумную камеру с давлением 0,013 Па, нагревали до заданной температуры, выдерживали и уплотняли ударным способом с энергией 8 кДж. Уплотнение осуществляли при температурах 25, 250, 450, 650, 750, 850, 950 и 1050 °С после изотермической выдержки в течение 20 мин.

Проводили контрольное свободное спекание образцов в вакууме при температурах 850 и 1050 °С в течение 20 мин с целью определения пористости заготовок перед ударным прессованием. Установлено, что плотность образцов в первом случае увеличилась до 71%, а во втором — до 84%. Спрессованные при разных температурах образцы в виде плоских дисков Ø26—27 мм и высотой 9—10 мм разрезали электроискровым способом на балочки (прямоугольные штабики) для исследования структуры и проведения механических испытаний. На шлифованных штабиках измеряли плотность и удельное электросопротивление. Кроме того, определяли механические свойства штабиков: прочность при изгибе (размеры образца 4×4×25 мм, база 20 мм) и сжатии (4×4×8 мм), предел прочности и относительную пластическую деформацию при растяжении, твердость по Бринеллю. Плотность измеряли гидростатическим методом. Удельное электросопротивление определяли, измеряя падение напряжения на образце и на эталонном сопротивлении. Структуру образцов исследовали на полированной поверхности при помощи электронных сканирующих микроскопов Superprobe-733 и Hitachi TM1000. С использованием этих же микроскопов выполняли фрактографический анализ образцов. Следует отметить также, что для сравнения структуры и механических свойств были подготовлены образцы аналогичных размеров из промышленной листовой меди М1 толщиной 6 мм.

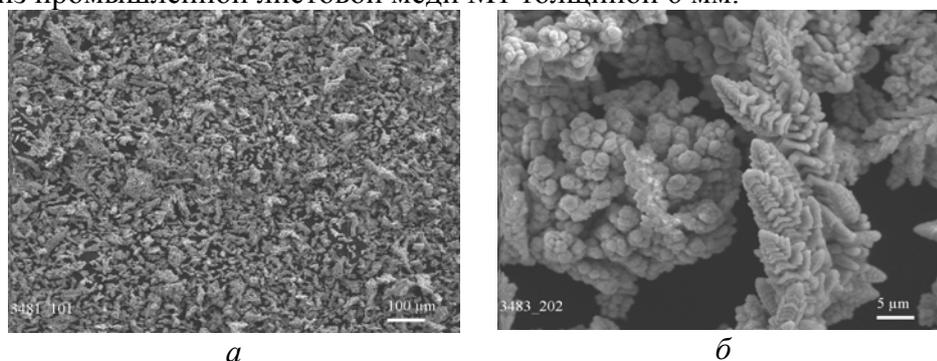


Рис. 1. Порошок меди ПМС-1: *a* — $\times 100$; *б* — $\times 2000$.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты определения плотности, удельного электросопротивления от температуры ударного уплотнения представлены на рис. 2. Как видно на рисунке, ударное прессование пористых заготовок при комнатной температуре приводит к относительной плотности более 97%. Уплотнение образцов при температурах 250—450 °С увеличивает плотность до 99%, а при 850 °С образцы получаются практически плотными, поскольку значения плотности на этих образцах совпадают со значениями плотности на образцах из листовой (промышленной) меди.

Удельное электросопротивление на образцах, спрессованных при температуре 250 °С, достаточно низкое и равно 2,26 мкОм·см, а при температурах уплотнения 850—1050 °С оно составляет 1,82—1,81 мкОм·см, в то время как измерение на образцах промышленной меди показало значения 1,76—1,78 мкОм·см, то есть почти справочную величину. Следовательно, отличие значений удельного электросопротивления порошковой меди от обычной промышленной составляет 2%. Данное отличие можно считать незначительным и полагать, что при таком электросопротивлении образцы должны иметь хорошие границы между частицами. Косвенной характеристикой качества границ в порошковых образцах являются их механические свойства.

Вначале были проведены испытания образцов на изгиб (рис. 3, *a*), поскольку порошковые материалы часто обладают повышенной хрупкостью и оценка их свойств часто ограничивается испытаниями на изгиб. В данном случае хрупкими оказались образцы, спрессованные при температурах 25 и 250 °С, хотя в последнем случае прочность при изгибе оказалась сравнительно высокой — 432 МПа. Остальные образцы проявили

пластичность при изгибе и по достижении прогиба 2—3 мм приложение нагрузки к образцам прекращалось. Поэтому приведенные на графике напряжения изгиба требуют некоторой корректировки с учетом приведения их к одинаковой величине прогиба. Важная информация следует из результатов испытания образцов на растяжение (рис. 3, б). По представленным данным, максимальная прочность при растяжении наблюдается у образцов, спрессованных при достаточно низкой температуре — 450 °С. При этом пористость образцов находится на уровне 1%.

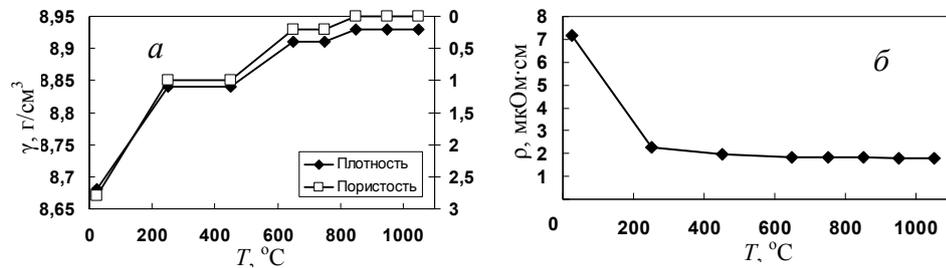


Рис. 2. Плотность (пористость) (а) и удельное электросопротивление (б) порошковых образцов меди в зависимости от температуры ударного уплотнения.

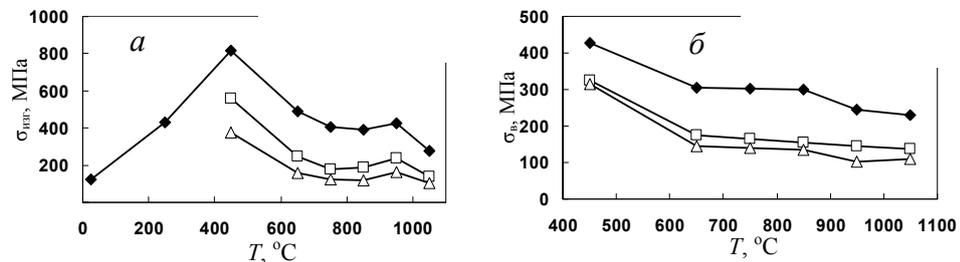


Рис. 3. Напряжения при изгибе (а) и предел прочности при растяжении (б) порошковых образцов меди в зависимости от температуры ударного прессования в вакууме: ◆, □, Δ — пределы прочности, текучести (0,2%) и текучести (0,01%) соответственно.

При повышении температуры ударного уплотнения пористость исчезает, а прочность уменьшается почти вдвое. Из этого следует, что незначительная пористость медных образцов не является критичной и что прочная связь между частицами образуется при ударном уплотнении и сравнительно низкой температуре. При этом необходимо обратить внимание на то, что процесс уплотнения длится тысячные доли секунды и за это время образуется качественная связь между частицами, не уступающая связи между зернами в обычной меди. Предел прочности при растяжении промышленной меди в тех же условиях составил 344 и 334 МПа. Из сравнения полученных данных по прочности порошковой и обычной меди следует, что прочность порошковой меди может быть выше прочности промышленной меди. Однако необходимо учитывать, что предел прочности является условной величиной, поскольку он равен отношению разрушающей нагрузки к начальному сечению образцов. В действительности, при растяжении образца поперечное сечение уменьшается и истинное напряжение, при котором разрушается образец, увеличивается. Поэтому важно знать истинное напряжение при разрушении образца. Его легко определить, зная относительное уменьшение площади поперечного сечения образца при растяжении (сужение) ψ . Истинное разрушающее напряжение $\sigma_{ист} = \sigma / (1 - \psi)$, где σ — условное напряжение в момент разрушения. Изменение сужения и истинного напряжения при растяжении образцов, полученных при разных температурах, представлено на рис. 4. Для сравнения отметим, что сужение для двух образцов промышленной меди составило 33 и 54%, а разрушающее напряжение — 345 и 471 МПа соответственно. Таким образом, порошковые образцы меди, уплотненные ударным методом в вакууме при температуре 450 °С, имеют более высокое напряжение разрушения, чем прокатанная промышленная медь. А повышение температуры уплотнения до 650—850 °С приводит к росту истинной прочности до 600—650 МПа.

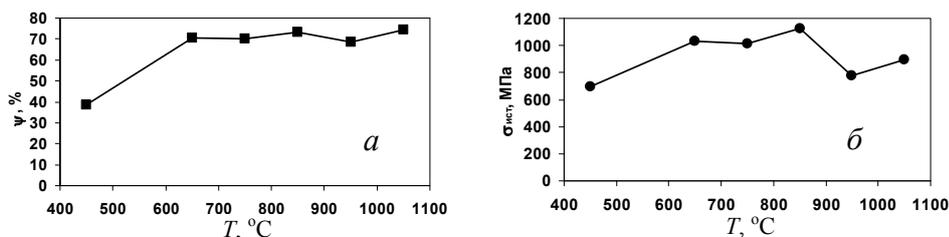


Рис. 4. Изменение сужения (а) и истинного напряжения (б) порошковых образцов меди в зависимости от температуры ударного уплотнения.

Необходимо также отметить и высокий уровень сужения в порошковой меди, спрессованной при температурах 650—1050 °С. Сужение в порошковых образцах выше такового в листовой меди и незначительно выше значения, приведенного в справочнике [2] (69%). Еще одна принципиальная характеристика пластичных металлов — условный предел текучести (при остаточной относительной деформации 0,2%). Для деформированной меди, по справочнику [2], он соответствует 287 МПа, для образцов из листовой меди — 70 МПа, для большинства порошковых образцов меди предел текучести составляет 155—175 МПа, а для образца, спрессованного при температуре 450 °С, он наиболее высокий — 326 МПа.

Интерес вызывает также твердость порошковой меди и предел текучести при сжатии (рис. 5). Данные характеристики менее “чувствительны” к пористости и качеству границ. Поэтому эти свойства имеют максимальные значения при самых низких температурах уплотнения, включая и комнатную температуру.

Твердость образцов из листовой промышленной меди составила 580 и 610 МПа, твердость по справочнику [2] — 870 МПа для деформированной меди, а твердость порошковой меди, полученной при низких температурах, в 1,5—2 раза выше приведенных значений (рис. 5, а). Предел текучести при сжатии порошковой меди, полученной при низких температурах, также значительно выше (в 2—3 раза) такового листовой меди, которую испытывали для сравнения.

В результате анализа механических свойств образцов порошковой меди и сравнения их со свойствами меди, полученной традиционным металлургическим методом, возникают два принципиальных вопроса. Во-первых, что влияет на изменение, а точнее снижение прочности образцов с увеличением температуры уплотнения, во-вторых, в чем причина появления более высокой прочности в порошковых образцах по сравнению со свойствами промышленной меди. Ответы на эти вопросы можно найти при рассмотрении структуры образцов порошковой меди после ударного уплотнения при разных температурах, а также структуры образцов обычной меди. В первую очередь была исследована плоская полированная поверхность (рис. 6). На приведенных фотографиях видно, что медь, спрессованная при 450 °С, является чрезвычайно мелкозернистой. Повышение температуры уплотнения до 650 °С приводит к заметному укрупнению структуры. При этом структура подобна структуре обычной меди, но только элементы структуры являются более мелкими. В случае уплотнения медного порошка при температуре 1050 °С структура образцов становится весьма крупнозернистой и даже более крупной, чем структура листовой меди.

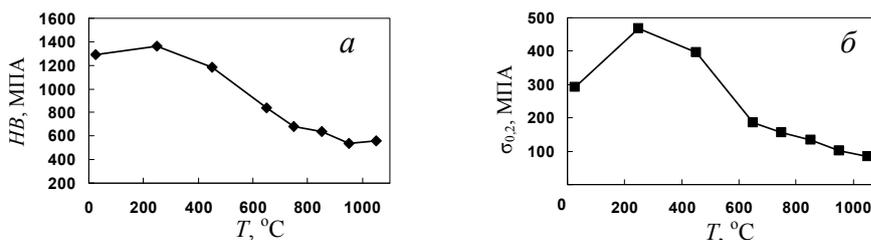


Рис. 5. Зависимость твердости (а) и предела текучести при сжатии (б) от температуры ударного уплотнения в вакууме.

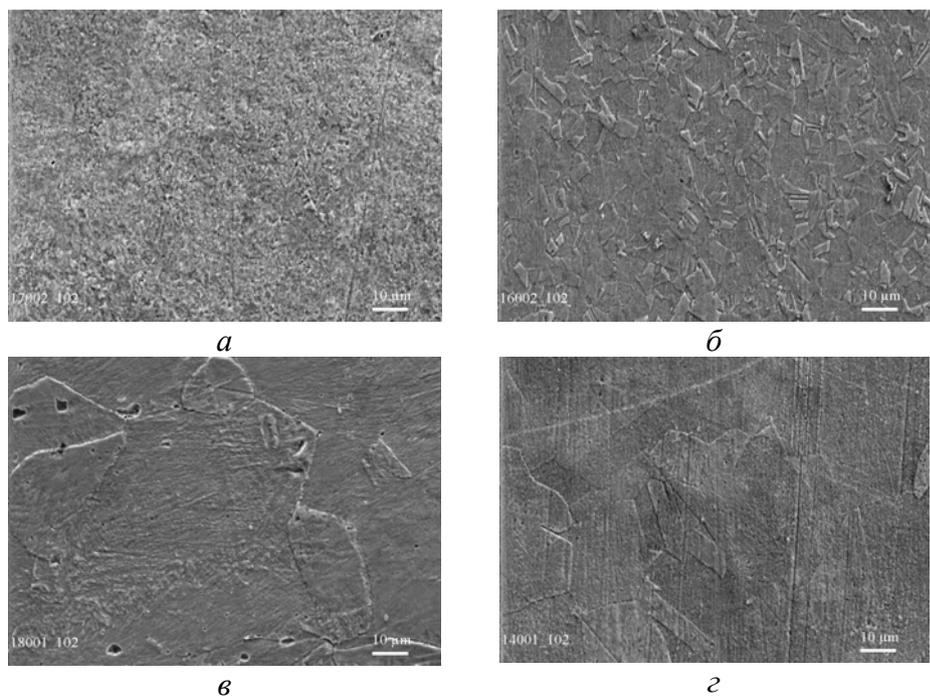


Рис. 6. Фотографии полированной поверхности образцов порошковой меди, полученных ударным уплотнением при температурах 450 (а), 650 (б) и 1050 °С (в), а также образца из листовой меди (з).

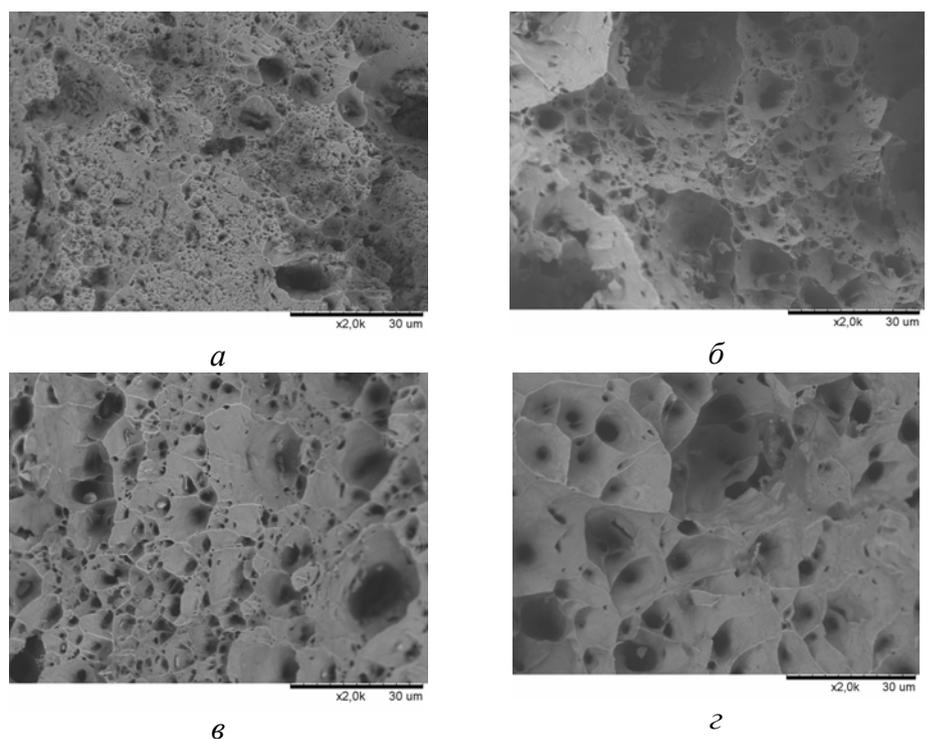


Рис. 7. Поверхность разрушения образцов порошковой меди, полученных ударным уплотнением при температурах 450 (а), 650 (б) и 1050 °С (в), а также образца из листовой меди (з).

Следовательно, ответом на первый вопрос является, как и следовало ожидать, существенное влияние структуры образцов на прочность при растяжении, которая значительно укрупняется при повышении температуры ударного уплотнения. Эта же причина является ответом и на второй вопрос. Подтверждает значительное влияние структуры на свойства образцов также фрактографический анализ структуры исследуемых и сравниваемых образцов. На рис. 7 показана поверхность разрушения образцов порошковой меди, уплотненных при разных температурах, и листовой меди. Приведенные фотографии поверхности разрушения также свидетельствуют об укрупнении

структуры образцов с повышением температуры уплотнения, поскольку при ямочном изломе на всех исследуемых образцах размеры ямок увеличиваются с возрастанием температуры ударного уплотнения.

Выводы

При ударном горячем уплотнении в вакууме порошка меди качественное взаимодействие между частицами за тысячные доли секунды происходит при температуре 450 °С. При данной температуре уплотнения образцы имеют прочность, соизмеримую с прочностью промышленной меди, а твердость и предел текучести более высокие.

Высокий уровень пластичности проявляется на образцах, уплотненных ударным способом при температуре 650 °С и более.

Варьируя температуру ударного прессования, можно управлять зернистостью образцов и в результате их механическими свойствами.

1. *Францевич И. Н.* Металлокерамические материалы в электротехнике // Современные проблемы порошковой металлургии / Под ред. И. М. Федорченко. — К.: Наук. думка, 1970. — С. 190—205.
2. *Физико-химические свойства элементов: (Справ.)* / Под ред. Г. В. Самсонова. — К.: Наук. думка, 1965. — 808 с.