

УДК 621.762.4

д.т.н Рябичева Л. А.
(Луганский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,
e-mail ryabic@gmail.com)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты исследования структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала, полученного различными механическими схемами деформации. Наименьшая величина зерна, наибольшая плотность, твердость и микротвердость получены при РКУ-прессовании.

Ключевые слова: наноматериалы, РКУ-прессование, холодная закрытая осадка, горячая закрытая осадка, плотность, твердость, микротвердость, предел прочности.

Развитие нанотехнологий в скором будущем должно изменить экономику и затронуть многие стороны создания новых материалов и изделий. Долгое время в обработке давлением занимались созданием технологий на макроуровне, т. е. формоизменением для изготовления деталей машин, получением проката. Сейчас получены данные, представляющие возможность на микроуровне управлять различными физико-химическими эффектами, позволяющими изготавливать новые изделия с высоким уровнем свойств. Академик Н. П. Лякишев отмечал «... известно, что свойства металлов улучшаются «измельчением» их структуры. Чем меньше частицы, из которых состоит сталь, тем выше ее качество. Прочность металлов в наносостоянии возрастает в 3–4 раза, твердость — во сто крат, усиливается стойкость к коррозии».

Современные масштабы производства в металлургии достигли значительных объемов: выплавка стали в мире превысила 1,3 млрд т в год; более 80 % выплавленной стали перерабатывается в металлопродукцию с использованием различных способов обработки давлением: прокатное, трубное и кузнечно-штамповочное производство [1]. В настоящее время только незначительная часть в металлургическом производстве занимает специальная металлургия,

направленная на производство конкурентоспособной металлопродукции.

Существуют ключевые приоритеты развития нанотехнологий, к которым относится применение процессов обработки давлением для получения новых материалов [2]. Многообразие методов порошковой металлургии, к которым относится компактирование нанопорошков, интенсивная пластическая деформация (ИПД), кристаллизация из аморфного состояния, обеспечивает широкие возможности для получения наноматериалов. Перспективными способами получения наноматериалов являются: спекание нанопорошков под давлением, кручение под гидростатическим давлением, знакопеременный изгиб, равноканальное угловое прессование [3].

В последние годы использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных материалов с ультрамелкозернистой структурой в субмикроструктурном (размер зерен $d \sim 100\text{--}1000$ нм) или нанокристаллическом ($d < 100$ нм) диапазонах становится одним из наиболее актуальных направлений обработки давлением и материаловедения. Такие материалы с новыми свойствами рассматриваются как перспективные конструкционные и функциональные материалы следующего поколения металлов и сплавов.

Любая пластическая деформация оказывает существенное влияние на микроструктуру и свойства материалов. Например, при интенсивной прокатке или протяжке происходит измельчение микроструктуры и формирование ячеек, субзерен и фрагментов, что может привести к определенному повышению их прочностных характеристик. Однако материалы, подвергнутые деформации этими традиционными методами, обычно обладают пониженной пластичностью, которая является одной из фундаментальных характеристик, необходимых для разработки новых конструкционных материалов. Как правило, и наноматериалы, получаемые компактированием порошков, обладают так же очень низкой пластичностью и, более того, часто бывают хрупкими [3]. Это является причиной растущего интереса к развитию методов интенсивной пластической деформации, позволяющих формировать ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры и, как результат, приводить к новым физическим и механическим свойствам.

Равноканальное угловое (РКУ) прессование наряду с кручением под высоким давлением относится к методам ИПД, впервые использованным для получения УМЗ металлов и сплавов. Несмотря на активное развитие нескольких новых методов ИПД (всестороннейковки, прокатки с наложением и соединением листов, специального циклического деформирования и ряда других), РКУ-прессование остается наиболее широко исследуемым методом ИПД. Кроме того, модернизация РКУ-прессования, в частности, при создании непрерывного процесса, может обеспечить его широкое практическое использование.

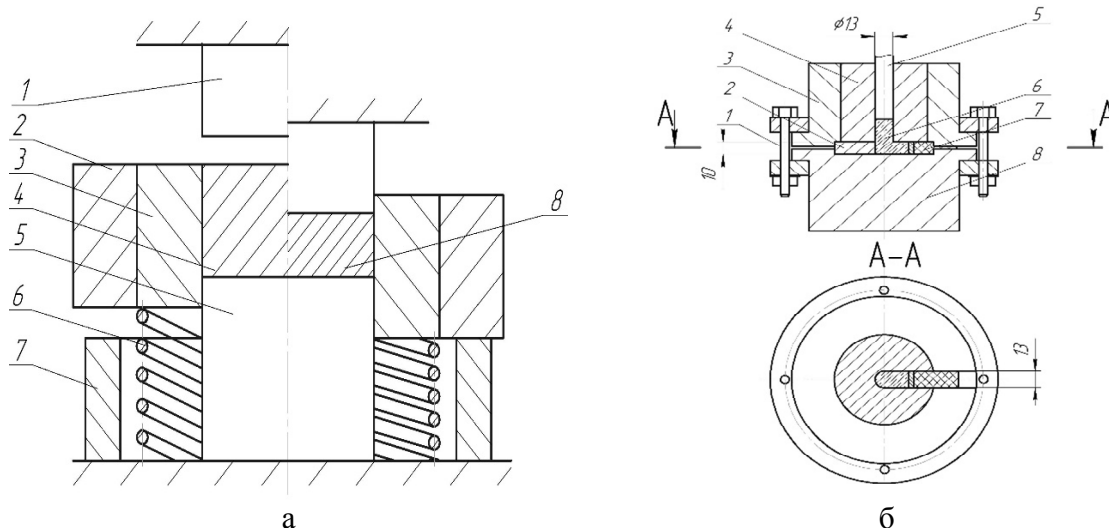
Целью работы является сравнительный анализ структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала, полученного различными механическими схемами деформации.

Образцы изготавливали из композиционного порошкового материала на медной основе. В качестве основной составляющей композиции использовали порошок стабилизированный медный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), форма частиц дендритная; в качестве легирующей добавки — порошок титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 1.90013-81) 0,5 % по массе. Номинальная величина частиц порошка титана 0,063 мм, форма частиц — дендритная. Смешивание порошков меди и титана выполняли механическим методом в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 0,5 ч. Образцы получали по следующей технологии: смешивание порошков, прессование, спекание, деформирование по двум схемам (РКУ-прессование и закрытая осадка при комнатной и повышенной температуре).

Двухстороннее прессование призматических образцов выполняли на гидравлическом прессе модели ПД-476 усилием 1600 кН. Спекание производили в лабораторной печи СШОЛ-11.6/12-МЗ по ступенчатому режиму в среде генераторного газа (состав газа: 72 % H_2 , 21 % CO , 5,5 % CO_2 , 1,5 % H_2O). Деформирование пористых образцов осуществляли на том же гидравлическом прессе. РКУ выполняли в штампе с приложением противодействия 110 МПа (рис. 1). Основная особенность штампа для РКУ-прессования состоит в конструкции пресс-формы, вертикальный входной канал которой имеет круглое сечение, а горизонтальный (выходной) канал — прямоугольное сечение. Это обеспечивает полное заполнение внешнего угла каналов, способствует накоплению большей степени истинной деформации и более равномерному распределению внутренних напряжений. Закрытую осадку выполняли при максимальном давлении 225 МПа в штампе, показанном на рисунке 1, б. Закрытую осадку производили при комнатной (ХЗО) и повышенной температуре 500°C (ГЗО).

После каждой операции определяли плотность образцов методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 20018-74). Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа МИМ-8. Микротвердость исследовали на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76), а твердость — на

приборе Роквелла (ГОСТ 9013-59); испытание на сжатие выполняли на универсальной испытательной машине Z/D 10/90. Насыпная плотность порошковой смеси меди с титаном составила $1,65 \text{ г/см}^3$ (ГОСТ 19440-74).



а (1 — верхний пуансон, 2 — бандаж, 3 — призматическая матрица, 4 — заготовка, 5 — нижний пуансон, 6 — пружина, 7 — скоба, 8 — образец); штамп для РКУ — б (1 — крепление, 2 — скоба, 3 — бандаж, 4 — матрица, 5 — верхний пуансон, 6 — прессовка, 7 — противодействие, 8 — нижняя плита)

Рисунок 1 Штамп для закрытой осадки

Плотность порошковой смеси рассчитывали по формуле аддитивности:

$$\rho_{см} = \frac{100\%}{\frac{X_{Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{X_{Ti}}{\rho_{Ti}}},$$

где X_{Cu} — содержание меди в смеси, %; плотность меди $\rho_{Cu} = 8,94 \text{ г/см}^3$;

X_{Ti} — содержание титана в смеси, %; плотность титана $\rho_{Ti} = 4,505 \text{ г/см}^3$.

Расчетная плотность образцов составила $8,89 \text{ г/см}^3$.

Размеры и плотность прессовок после прессования приведены в таблице 1, после спекания — в таблице 2. После спекания плотность образцов увеличилась вследствие их усадки.

Таблица 1

Размеры и плотность прессовок

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см^3	Пористость, %
I – РКУ	$\text{Ø}12,75 \times 54,30$	7,64	14,06
II – ХЗО	$12 \times 12,7 \times 54,2$	7,59	14,96
III – ГЗО	$12,0 \times 12,5 \times 54,2$	7,57	14,88

Таблица 2

Размеры и плотность прессовок после спекания

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %
I	∅12,45×53,20	8,25	7,3
II	11,73×12,35×53,1	8,18	8,0
III	11,72×12,35×53,1	8,19	7,9

Изменения размеров и плотности образцов после различных схем деформации представлены в таблице 3.

Из анализа таблицы 3 следует, что после РКУ-прессования плотность по всему объему образца одинаковая, практически отсутствует разноплотность вследствие схемы всестороннего неравномерного сжатия (рис. 3). После холодной закрытой осадки плотность самая низкая из трех исследуемых схем деформации, причем у стенок матрицы она меньше, вследствие сил контактного трения. После горячей закрытой осадки это уменьшение несколько меньше.

В структуре образцов после спекания видны зерна меди, частицы титана и поры (рис. 3). Среднестатистическая величина

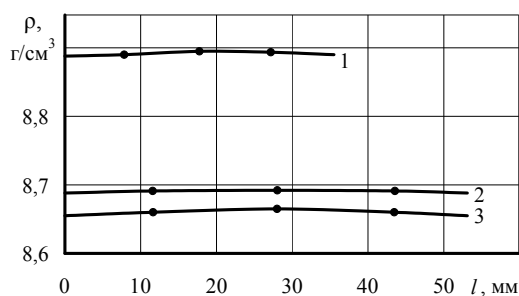
зерна меди составляет 21–22 мкм, размер частиц титана — 55 мкм, в то время как номинальный размер частиц порошка титана ВТ1-0 составляет 63 мкм.

Анализ микроструктуры после РКУ-прессования вдоль оси на боковой части образца показал ярко выраженную текстуру деформации: зерна меди и частицы титана вытягиваются вдоль направления деформирования (рис. 4, а) [4]. После холодной закрытой осадки сформировалась крупнозернистая равноосная структура с крупными частицами титана (рис. 4, б). Горячая закрытая осадка выполнена выше температуры рекристаллизации, что привело к образованию зерна меньшего размера, чем при холодной осадке (табл. 4) [5].

Таблица 3

Плотность и размеры образцов после деформации

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %
I	10×10×35,5	8,89	0,088
II	9,57×12,7×54,2	8,66	2,67
III	8,72×12,7×54,2	8,76	1,54

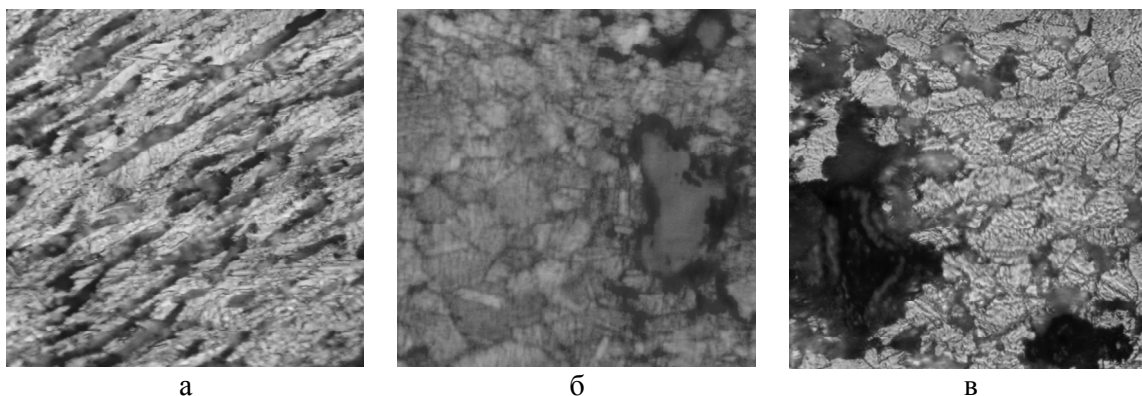


1 — РКУ-прессование; 2 — ГЗО; 3 — ЗО

Рисунок 2 Распределение плотности по длине образца



Рисунок 3 Микроструктура после спекания, х500



а — РКУ-прессования (средняя зона); б — ХЗО; в — ГЗО, х1440

Рисунок 4 Микроструктура после деформирования

Деформирование образцов по различным схемам деформации привело к измельчению зерна и частиц титана (табл. 4). Наименьший размер зерна меди и частиц титана получен после РКУ-прессования [6]. По изменению микротвердости оценивали уровень напряжений в образцах после различных схем деформации (рис. 5). Вследствие жесткой схемы напряженного состояния при РКУ-прессовании получен наиболее высокий уровень микротвердости, что и обеспечило высокую плотность образцов (рис. 5, а). После закрытой осадки

микротвердость меньше, что соответствует увеличению плотности.

Для оценки влияния схемы деформации на формирование механических свойств материала измеряли твердость и определяли предел текучести и предел прочности при сжатии. Характер распределения твердости аналогичен распределению микротвердости (рис. 5, б). Наиболее высокие прочностные свойства получены после РКУ-прессования, очевидно, вследствие более прочных контактных связей между частицами (табл. 5).

Таблица 4

Размер зерна после деформирования

	d_{Cu} , мкм	d_{Ti} , мкм
РКУ-прессование	2,3-2,5	2,11
ХЗО	15,8	47,40
ГЗО	19,3	40,3

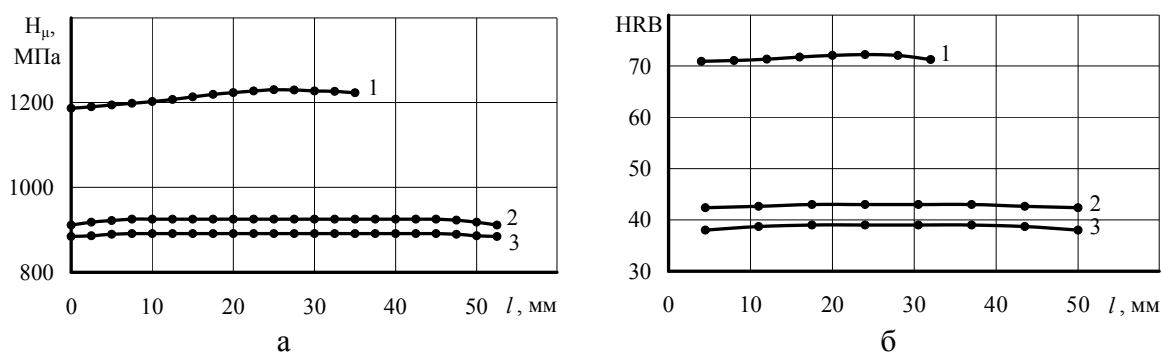


Рисунок 5 Распределение микротвердости а и твердости – б после деформирования:
1 — РКУ-прессование; 2 — ХЗО; 3 — ГЗО

Таблица 5

Механические свойства

	σ_T , МПа	σ_B , МПа
РКУ-прессование	625	881,5
ХЗО	451,4	677,2
ГЗО	525	697,5

Вывод. Выполнены сравнительные исследования по влиянию схемы деформации на формирование структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала.

Наименьшая величина зерна, наибольшая плотность, твердость и микротвердость, а также прочностные свойства получены после РКУ-прессования вследствие более прочных межчастичных связей.

Библиографический список

1. Дубровский, В. А. Современные тенденции развития технологии в машиностроении и перспективы использования прогрессивных методов обработки металлов давлением [Текст] / В. А. Дубровский, Н. И. Подволоцкая, В. П. Ступников // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2005. — № 5. — С. 3–6.
2. Колпаков, С. В. Перспективы развития мировой металлургии [Текст] / С. В. Колпаков / Металлург, 2005. — № 1. — С. 3–7.
3. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
4. Рябичева, Л. А. Технология изготовления порошковых деталей методами пластического деформирования [Текст] / Л. А. Рябичева. — Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2011. — 180 с.
5. Рябичева, Л. А. Структура и свойства порошковой меди после РКУ-прессования [Текст] / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк, В. В. Смоляк, Т. А. Рябовол // 3-я Международная конференция HighMatTech. — Київ, 2011. — С. 268.
6. Рябичева, Л. А. Новые порошковые материалы: структура и свойства [Текст] / Л. А. Рябичева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. Луганськ. — Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. — № 1(12). — С. 3–12.

© Рябичева Л. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
пом. нач. сортопрокатного цеха ПАО «АМК», к.т.н. Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 09.10.17.

д.т.н Рябічева Л. О. (Луганський національний університет ім. В. Даля, Луганськ, ЛНР, e-mail ryabic@gmail.com)

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

У статті подано результати дослідження структури та фізико-механічних властивостей порошкового мідно-титанового матеріалу, отриманого різними механічними схемами деформування. Найменшу величину зерна, найбільшу щільність, твердість та мікротвердість отримано при РКУ-пресуванні.

Ключові слова: наноматеріали, РКУ-пресування, холодна закрита осадка, гаряча закрита осадка, щільність, твердість, мікротвердість, межа міцності.

Doctor of Eng. Riabicheva L. A. (V. Dahl Luhansk National University, Lugansk, LPR)

PROSPECTS OF DEVELOPING THE METHODS OF NANOMANUFACTURING

The paper presents the results of studying the structure and physical and mechanical properties of powdered copper-titanium material manufactured on various mechanical deformation schemes. The smallest grain size, the largest density, hardness, and microhardness have been achieved through CGS-pressing.

Key words: nanomaterials, CGS-pressing, cold closed sediment, hot closed sediment, density, hardness, microhardness, ultimate strength.