

## ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Шалунов Е.П.

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
г. Чебоксары, Россия,  
[shalunov@chuvsu.ru](mailto:shalunov@chuvsu.ru)

В последние годы, благодаря применению различных способов интенсивной пластической деформации (ИПД) – интенсивное кручение под высоким давлением, равнонаправленное угловое (РКУ) прессование, винтовая экструзия и пр. - для измельчения микроструктуры массивных кристаллических образцов и заготовок до нанодисперсного уровня, удалось существенно повысить прочностные свойства многих традиционных материалов, которые в таком состоянии стали относиться к объемным наноструктурным материалам [1]. Одним из эффективных способов ИПД, применимым к порошковым материалам, является обработка порошков или их смесей в высокоэнергетических мельницах. При этом происходит интенсивная пластическая деформация и измельчение порошков, ускоряется массоперенос компонентов порошковой смеси, а также осуществляется перемешивание ее компонентов на атомарном уровне (механическое легирование) [1]. Высокий уровень внутренних напряжений создается из-за большой плотности внесенных во время деформации дислокаций, дисклинаций, вакансий и других дефектов кристаллической решетки.

Однако, в наноструктурных материалах, полученных методами ИПД, включая механическим легированием, рост зерен начинается при относительно низких температурах, близких к  $0,4T_{пл}$  и даже ниже [1]. Например, при низкотемпературном отжиге процессы возврата в наноструктурной меди, подвергнутой ИПД кручением, начинаются значительно раньше, чем в крупнокристаллической меди.

Известно [2,3], что затормозить рост зерен в наноструктурных материалах практически до температуры плавления матрицы способно наличие в них термодинамически стабильных соединений с высоким значением модуля сдвига и с размерами нанодисперсного уровня. Согласно существующим моделям дисперсного упрочнения металлов [2,3], основанным на рассмотрении взаимодействия движущихся дислокаций с тонкодисперсными частицами и на наличии линейной зависимости прироста прочности матричного материала от обратной величины среднего межчастичного расстояния, наибольший эффект упрочнения следует ожидать в том случае, если среднее расстояние между частицами будет составлять 100...500 нм, а средний размер самих частиц будет находиться в диапазоне от 10 нм до 50 нм.

Наиболее эффективно обеспечить материалам тонкую структуру с указанными выше параметрами, относящими их к объемным наноструктурным материалам [2], удастся с использованием метода реакционного механического легирования, осуществляемого в высокоэнергетических шаровых мельницах, в частности, в атриторах [4–10]. Этот метод является разновидностью механического легирования и заключается в совместной обработке в атриторе порошков матричного металла и элементов, взаимодействующих с матричным металлом или между собой с образованием упрочняющих тугоплавких фаз (оксидов, карбидов, нитридов и пр.) нанодисперсного уровня. При оптимальных условиях обработки порошковой смеси в мельнице и правильно подобранном химическом составе порошковой смеси упрочняющие фазы возникают уже на этой стадии технологического передела в результате развития процесса механохимического синтеза [7, 9, 10]. Промышленно получаемые таким способом объемные наноструктурные материалы торговой маркой Дискон<sup>®</sup> на основе порошковой меди [5–8] и на основе порошков алюминия или его сплавов [4, 9] имеют температуру рекристаллизации, достигающую  $0,92T_{пл}$  матричного металла.

Соотнесение накопленного автором обширного экспериментального материала по разработке и исследованию объемных наноструктурных материалов, получаемых с использованием метода реакционного механического легирования в атриторах, с известными теоретическими выкладками по дисперсному упрочнению материалов позволило установить для указанных выше материалов взаимосвязь между пределом текучести при растяжении  $\sigma_{0,2}$  и их структурными параметрами в следующем виде [4]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{PN} + \sigma_M + \sigma_V + \sigma_S + \sigma_P, \quad (1)$$

где  $\sigma_{PN}$  – напряжение трения решетки матричного металла;  $\sigma_M$  – упрочнение твердого раствора матричного металла растворенными в нем легирующими элементами;  $\sigma_V$  – упрочнение, благодаря повышению плотности дислокаций;  $\sigma_S$  – упрочнение за счет субзерен;  $\sigma_P$  – упрочнение дисперсными частицами.

В работах [4, 10] приводятся конкретные формулы с поправочными для них коэффициентами, определенными на основе массива полученных экспериментальных данных, для расчета приведенных в (1) составляющих, а также полученные по ним численные значения этих составляющих, позволяющие оценить вклад каждого из них в упрочнение объемных наноструктурных материалов (например, системы Al–C–O с 4% масс. C), изготавливаемых с использованием метода реакционного механического легирования. В частности, показано, что повышение плотности дефектов и одновременное снижение размера зерна матрицы приводит к увеличению прочностных характеристик и снижению пластичности таких материалов.

Однако формула (1) не отражает взаимосвязи между прочностными и пластическими свойствами исследуемых материалов, что становится очень важным для того, чтобы оценить их сбалансированность между собою и, тем самым, по-сути, установить качество самого технологического процесса их получения. Особую важность это приобретает при планировании уровня прочностных и пластических свойств для таких материалов при их усовершенствовании или разработке новых.

Поскольку задача оценки качества исследуемых материалов (получаемых в виде горячехлудированных полуфабрикатов) при формализации сводится к выяснению полноты соответствия экспериментально полученных значений механических свойств директивно заданным величинам, то представляется разумным использовать для решения задачи аппарат функций желательности [11]. В качестве параметра, обобщающего прочностную и пластическую характеристики материала, принята обобщенная функция желательности  $D$ , которая при параметрах оптимизации в виде безразмерных элементарных функций желательности  $d_1$  (для предела прочности при растяжении  $\sigma_B$ ) и  $d_2$  (для относительного удлинения  $\delta_5$ ) будет иметь вид:

$$D = \sqrt{d_1 \cdot d_2}, \quad (2)$$

В качестве пороговых значений каждого параметра оптимизации приняты верхние и нижние значения  $\sigma_B$  и  $\delta_5$ , что соответствует, соответственно, максимуму и минимуму желаемым уровням качества этих материалов, являющимся реперными точками. Например, для объемного наноструктурного материала системы Al–C–O с реперными точками по  $\sigma_B$  550 МПа и 500 МПа и по  $\delta_5$ , соответственно, 5% и 3% величина функции желательности  $d_1$  будет равна 0,800 и 0,370. При таких значениях реперных точек величина функции желательности будет связана с натуральными значениями параметров следующими зависимостями:

$$\text{- для предела прочности: } d_1 = e^{-\{r^{-n}\}}, \text{ где } y_1 = \sigma_B \cdot 0,032 - 16, \quad (3)$$

$$\text{- для относительного удлинения: } d_2 = e^{-\{r^{-n}\}}, \text{ где } y_2 = \delta_5 \cdot 0,800 - 2,4. \quad (4)$$

Оценка прочностных и пластических свойств материала системы Al-C-O с 4%мас.С с помощью функции желательности позволила выявить из всего многообразия вариантов технологических процессов его изготовления наиболее оптимальный, обеспечивающий при значениях функции желательности  $D=0,444\dots0,720$  получение горячепрессованных полуфабрикатов, имеющих значения  $\sigma_B = 510\dots550\text{МПа}$  и  $\delta_5 = 3,2\dots4,5\%$ . Установленные так же корреляционные связи, значимые при уровне 99%, между  $\delta_5$  и относительным сужением  $\varphi$  ( $\varphi = 1,88 \cdot \delta_5 - 1,13$ ), твердостью по Виккерсу HV и  $\sigma_B$  ( $HV = 2,91 \sigma_B$ ), пределом длительной прочности  $\sigma_{350}^{100}$  при 350°C и 100ч и  $\sigma_B$  ( $\sigma_{350}^{100} = 39 + \sigma_B$ ) позволили в итоге получить многофакторную модель указанного выше материала, устанавливающую взаимосвязь между основными его прочностными и пластическими характеристиками.

## Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Скороход В.В. Наноструктурные материалы. Киев: Ин-т проблем материаловедения НАНУ, 1998. 413 с.
3. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсно упрочненные материалы. М.: Металлургия, 1974. – 268 с.
4. Schalunov E.P., Slesar M., Besterci M., Oppenheim H., Jangg G. Einfluss der Herstellungsbedingungen auf die Eigenschaften von Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>-Werkstoffen // Metall. - 1986. № 6 - S.601-606.
5. Österreich.-Patent 400.580. Kupferwerkstoff für elektrisch leitende Verschleisteile/
6. E. Schalunov, G. Jangg, H. Walther, A. Matrosov u.a. ÖA Nr.1341/93 von 08.07.1993.
7. Патент РФ 2116370. Способ получения дисперсно-упрочненных материалов на основе меди / Е.П. Шалунов. Заявл. 27.03.1997.
8. Шалунов Е. П. Жаро- и износостойкие медные гранулированные композиционные материалы с механохимически синтезированными упрочняющими наночастицами ДИСКОМ® и высоко-ресурсная продукция из них // Нанотехника. - 2007. № 1 (9). - с.69-78.
9. Shalunov E.P., Matrosov A.L., Chen L. Development, production and application of DISCOM® copper nanocomposites as highly resource electrode and electric contact materials: Proc. of Int. Powder Metallurgy Congress (EURO PM2008), Mannheim, 2008, sept. 29 oct.1. - Vol. 1. Shrewsbury: EPMA, 2008. - pp. 113-119.
10. Алюминиевые гранулированные композиционные материалы с механохимически синтезированными упрочняющими наночастицами ДИСКОМ® / Е.П. Шалунов, А.Л. Матросов, М.А. Шведов, В.М. Смирнов, Я.М. Липатов // Нанотехнологии-производству-2006: Тр. междунар. научно-практ. конф., Фрязино, 29-30 ноября 2006 г. – М.: «Янус-К», 2006. – с.26-34.
11. Шалунов Е.П., Матросов А.Л. Нанокompозиты: гранулированные композиционные материалы с механохимически синтезированными упрочняющими наночастицами. – Там же. – с.35-37.
12. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304с.