

**Прочность ультрадисперсных материалов, полученных методом интенсивной пластической деформации**

Студент гр.10402129 Понтаплёв Н.А.  
Научный руководитель – Томило В.А.  
Белорусский национальный технический университет  
г.Минск

Хотя механические и физические свойства всехкристаллических материалов определяются несколькими микроструктурными параметрами, средний размер зерна материала обычно играет очень значительную, а часто и доминирующую роль.

Хорошо известно, что прочность поликристаллических материалов обычно связана с размером зерна  $d$  через уравнение Халл-Петча (ХП), которое гласит, что предел текучести задается через:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2},$$

где  $\sigma_0$  – называется напряжением трения;

$k_y$  – константа текучести.

Из уравнения следует, что прочность увеличивается с уменьшением размера зерна, и это привело к постоянно растущему интересу к изготовлению материалов с чрезвычайно малыми размерами зерна.

Объектами исследования являются несколько чистых металлов, а также коммерческие сплавы Al, Mg, Si, аустенитная сталь и низкоуглеродистые стали. Чтобы получить ультрадисперсную структуру, твердосплавные сплавы подвергали кручению под высоким давлением и равноканальному угловому прессованию. Для обработки сплавов под высоким давлением использовали приложенное давление 6 ГПа и 20 оборотов. Изготовленные образцы имели форму дисков диаметром 20 мм и толщиной 0,6 мм, которые хорошо подходят для механических испытаний. Обработка равноканальным угловым давлением была выполнена с использованием штампов диаметром 10 и 20 мм [1].

Структурная характеристика была выполнена с помощью просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и атомно-зондовой томографии. Размер и распределение зерен по размерам были оценены на основе измерений темного поля в плоскости кручения на протяжении более 350 зерен из области, расположенной в середине радиуса диска для обработки под высоким давлением. Диаграммы дифракции электронов в выбранной области были взяты из области диаметром 1,3 мкм. Рентгенографию проводили с помощью аналитического дифрактометра PanX'pert с использованием излучения Cu и Ka (50 кВ и 40 мА). Параметр решетки для исходных сплавов и сплавов, обработанных под высоким давлением, был рассчитан по рентгеновским данным в соответствии с методом экстраполяции Нельсона-Райли [2]. Испытания на растяжение были точно выполнены с использованием лазерного экстензометра при комнатной температуре со скоростью деформации  $10^{-4}$  на испытательной машине с компьютерным управлением, работающей с постоянным перемещением захватов образца. Прочностные характеристики оценивались по испытательные образцы с калибром  $2,0 \times 1,0 \times 0,4$  мм<sup>3</sup>.

Хотя возможно достичь нанокристаллической структуры с размером зерна менее 100 нм в ряде металлов и сплавов с помощью обработки под высоким давлением и равноканального углового прессования для обработки интенсивной пластической деформацией (ИПД) типично формировать ультрадисперсные структуры со средними размерами зерен в субмикрометровом диапазоне, так что, обычно размеры зерен составляют ~100–300 нм [1].

В то же время в зависимости от режимов обработки ИПД (величина деформации, температура и скорость деформации, приложенное давление) происходит формирование различных границ зерен, занимающих место так, чтобы лишние вывихи, близнецы, зернограницные выделения и осадки также могут оказывать значительное влияние на свойства ультрадисперсных материалов после обработки.

В целом, в исследованиях были выявлены четыре типа границ зерен в ультрадисперсных металлах и сплавах, произведенных ИПД, которые можно наблюдать с помощью применения современных методов структурного анализа, таких как просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения, 3D-атомный зонд и т.д.

В последние годы поведение графика ХП в диапазоне сверхтонких размеров зерен стало объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований.

Однако для наноразмерных зерен (20–50 нм) обычно сообщается, что это соотношение нарушается, так что график ХП отклоняется от линейной зависимости в сторону более низких значений напряжений, а его наклон  $k_y$  часто становится отрицательным (рисунок 1, кривая 1). В настоящей работе демонстрируются примеры, отражающие «положительный» наклон отношения графика ХП (рисунок 1, кривая 2).

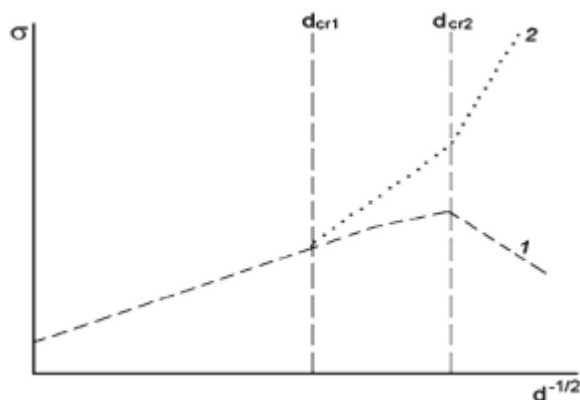


Рисунок 1 – Два типа наклонов ХП в разных масштабах характерной длины

Исследования свидетельствуют о том, что предел текучести ультрадисперсных металлов и сплавов, полученных ИПД, может быть значительно выше, чем предсказывается соотношением ХП для их диапазона размеров зерна. Наблюдаемый положительный наклон в отношении ХП обеспечивает появление сверхпрочности этих материалов, и это связано с их структурой границ зерен, в первую очередь с неравновесным состоянием и сегрегациями границ зерен. Следовательно, дизайн границ зерен в ультрадисперсных материалах, полученных методами ИПД, весьма важен для достижения высокой прочности в наноматериалах. Кроме того, актуальным для проводимых исследований является изучение роли внутрикристаллических наноструктурных элементов наночастиц, которые могут привести к дополнительному упрочнению материалов.

#### Список использованных источников

1. Valiev, R. Z. Prog. Mater. Sci. / R.Z. Valiev, T. G. Langdon. – 2006. – 881 p.
2. Klug, H. P. X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials / H. P. Klug, L. E. Alexander. – New York: John Wiley & Sons, 1974. – 274 p.