

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ  
НАНОЛАМИНАТОВ НА ОСНОВЕ Cu-Nb ПОСЛЕ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ  
(ИНТЕНСИВНОЙ) ДЕФОРМАЦИИ**

<sup>1,2</sup>Глезер А.М., <sup>3</sup>Карпов М.И., <sup>2</sup>Пермякова И.Е., <sup>1</sup>Штанский Д.В.,  
<sup>1</sup>Горшенков М.В., <sup>1</sup>Щетинин И.В.

<sup>1</sup>НИТУ «МИСус», г. Москва, Россия, E-mail: a.glezer@mail.ru

<sup>2</sup>ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Россия, E-mail: inga\_perm@mail.ru

<sup>3</sup>ИФТТ РАН, г. Черногловка, Россия

**Введение**

Металлические многослойные композиты с наноразмерной толщиной слоев - наноламинаты, являются типичными представителями наноструктурных материалов. Композиты Cu-Nb состоят из металлов, взаимная растворимость которых близка к нулю. В сочетании с высокой пластичностью это свойство делает их идеальной парой для получения наноламината. Кроме того, такой наноламинат представляет интерес как объект с интересными физическими свойствами: высокая электропроводность меди, сверхпроводимость ниобия [1].

Возникла идея подвергнуть наноламинаты системы Cu-Nb, мегапластической деформации (МПД) в камере Бриджмена. Как известно, большие деформации позволяют реализовывать новые структурные состояния и уникальные свойства в материалах, недоступные для классических методов механических испытаний. Целью настоящей работы является детальное изучение структурных превращений и изменения механических характеристик (в частности микротвердости в трех измерениях) в зависимости от степени деформации, которая осуществлялась в условиях кручения при высоком квазигидростатическом давлении.

**Методика**

Композиты Cu-Nb получали путем проведения многократной пакетной прокатки – последовательности операций, составляющих технологический цикл: сборка пакета из определенного числа слоев, горячая прокатка пакета в вакууме, холодная прокатка на воздухе до толщины, равной толщине одного исходного слоя, составляющего композит [2].

МПД осуществляли в камере Бриджмена при давлении  $P = 4$  ГПа при различных величинах деформации в диапазоне  $(1/2-4)N$ , где  $N$  – число полных оборотов подвижной наковальни.

Изменения в структуре образцов изучались с помощью ПЭМ и СПЭМ. Анализ химического состава и распределения элементов в образцах осуществлялся с применением методов светлопольной СПЭМ и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией. В дополнение к ПЭМ и СПЭМ наличие аморфной и кристаллической фаз контролировалось проведением РСА.

Инденитирование нанокompозитов проводили в области  $1/2$  радиуса консолидированных дисковых образцов по стандартной методике на приборе ПМТ-3М в трех измерениях.

**Результаты**

Наблюдается постепенное измельчение структуры нанокompозитов Cu/Nb, при сохранении ориентированности структурных составляющих при МПД (рис. 1).

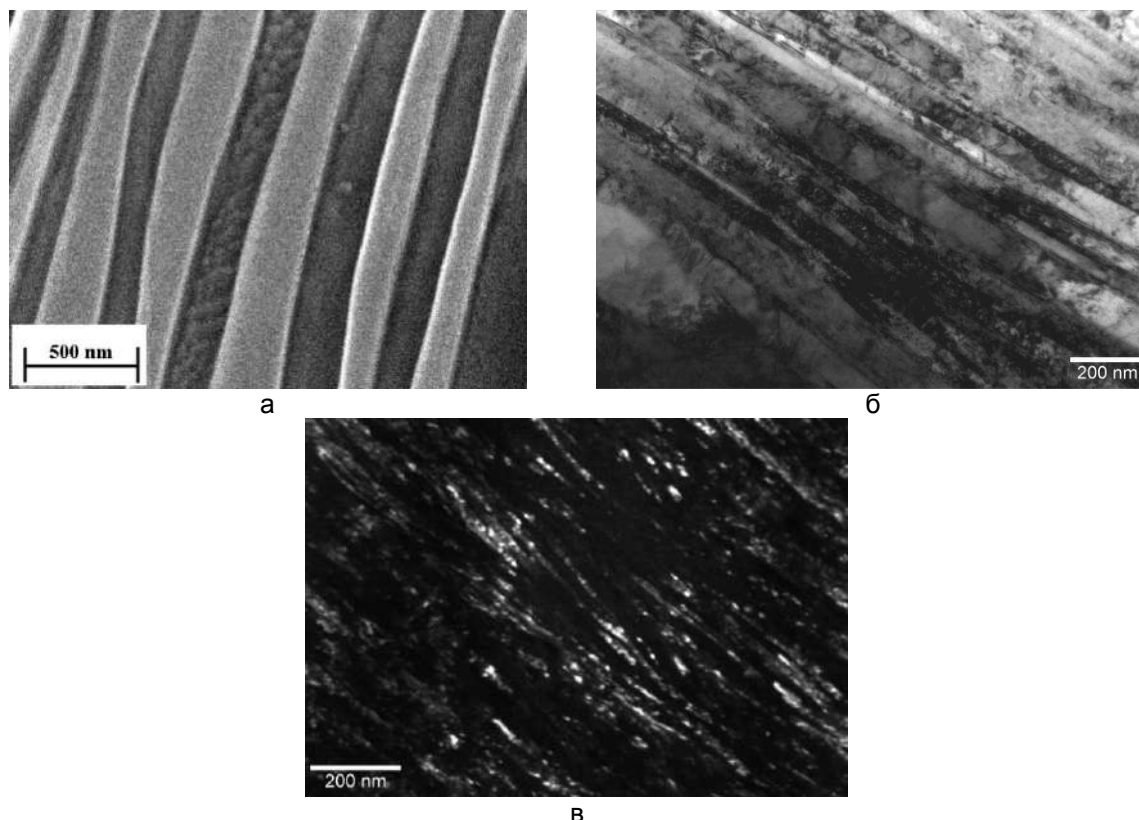


Рисунок 1 – ПЭМ-изображения планарной структуры наноламинатов Cu-Nb до деформации (а), в светлом поле после 2 оборотов (б) и в темном поле 4 оборотов (в)

Установлен частичный переход исследуемого материала из кристаллического состояния к аморфному при достижении МПД  $N = 4$ , что нашло подтверждения в ПЭМ-исследованиях и РСА (рис. 2).

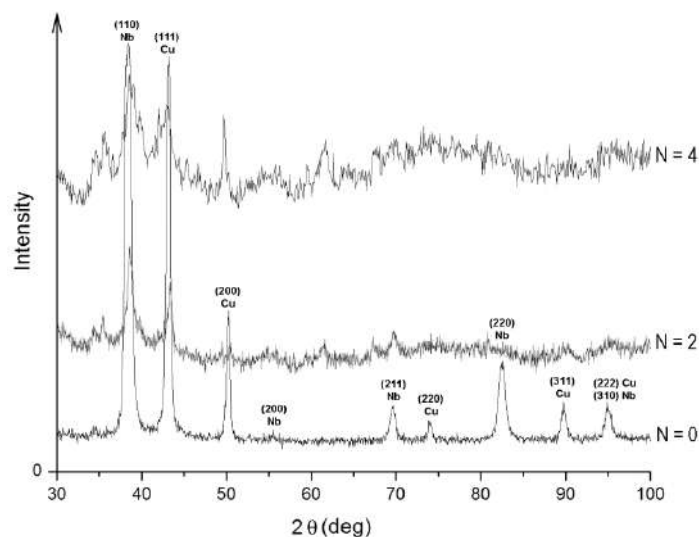


Рисунок 2 – Рентгеновские спектры нанокромпозитов Cu/Nb до и после МПД

Установлен характер изменения микротвердости нанокмпозитов Cu-Nb в зависимости от степени деформации (рис. 3). В исходных образцах до обработки МПД наблюдается анизотропия механической характеристики  $Hv$ . При индентирование двух взаимноперпендикулярных торцов значения их микротвердости несколько выше (см. на оси Y и Z рис. 3), чем значение  $Hv$  плоской поверхности дисковых образцов (см. на ось X). На рисунке 3 видно, что малый прямоугольный параллелепипед имеет неравными между собой величины ребер  $Hv$ . По мере увеличения степени деформации отмечен существенный рост микротвердости во всех направлениях (см. средний

прямоугольный параллелепипед рис. 3). При  $N = 2$  наблюдается максимальное отличие микротвердости на поверхности (значения по оси X) по сравнению с торцами (по Y и Z). Таким образом, при  $N = 2$  зафиксирован упрочняющий поверхностный эффект исследуемых наноламинатов системы Cu/Nb: – разница между  $Hv$  на поверхности и в объеме составляет 29 %.

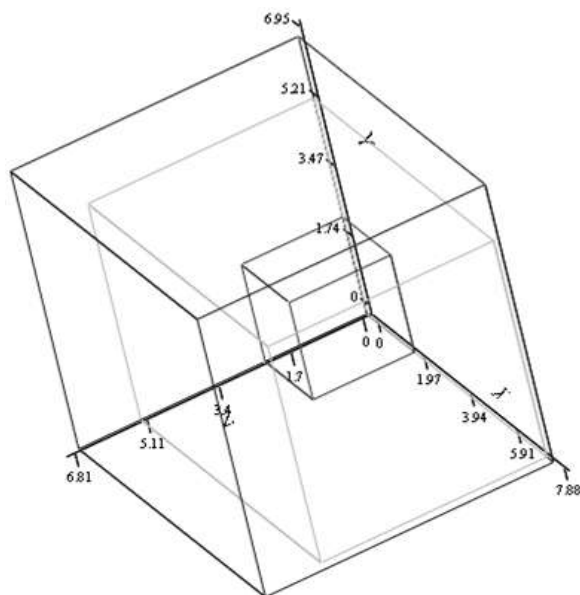


Рисунок 3 – Поведение микротвердости  $Hv$  (ГПа) нанокompозитов Cu-Nb в трех взаимоперпендикулярных направлениях в зависимости от степени деформации: малый прямоугольный параллелепипед – до обработки ( $N = 0$ ), средний прямоугольный параллелепипед и большой куб – после обработки МПД (при  $N = 2$  и 4, соответственно).

Обнаружен переход от анизотропии микротвердости в исходном состоянии к изотропии данного свойства при достижении МПД в 4 оборота: см. на рисунке 3 большой куб с равными между собой значениям ребер  $Hv$ .

Таким образом, с увеличением степени деформации в процессе кручения при высоком давлении наблюдается существенное упрочнение нанокompозитов системы Cu/Nb. При сравнении с исходным значением микротвердости (при усреднении по объему) до обработки МПД ( $Hv_0 \approx 2,28$  ГПа) и после 4 оборотов ( $Hv_{\text{МПД}} \approx 6,84$  ГПа), можно констатировать трехкратное увеличение данной механической характеристики.

После существенных мегапластических деформаций впервые обнаружено образование областей с аморфной (некристаллической) структурой, непосредственно связанных с межфазными границами нанокристаллов Nb и Cu.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-02-00402\_A).

#### Список литературы:

1. Andrievski R.A., Khatchoyan A.V. Nanomaterials in Extreme Environments. Fundamentals and Applications. Springer International Publishing. Springer Series in Material Science. - 2016. -V. 230. -124 p.
2. Карпов М.И., Внуков В.И., Волков К.Г., Медведь Н.В., Ходос И.И., Абросимова Г.Е. // Материаловедение. -2004. -№ 1. -С. 48-53.