

**MICROSTRUCTURE OF COPPER/GRAPHENE COMPOSITE
OBTAINED BY HIGH-PRESSURE TORSION**

*Galiya Ferdinandovna Korznikova ^a, Aynur Fardatovich Aletdinov,
Gulnara Rashitovna Khalikova*

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Stepan Khalturin st. 39, 450001, Ufa, Russia

^a korznikova@anrb.ru

ABSTRACT

Copper/graphene matrix composites are promising for a wide range of applications due to their good thermal and electrical conductivity. However, there are important problems in the synthesis of copper/graphene composites due to poor dispersion of graphene in the matrix and weak interfacial bonding. Intense plastic deformation by high-pressure torsion makes it possible to obtain bulk samples with nanocrystalline structure, free from pores and impurities. This method was successfully used to fabricate Cu/graphene composite from thin copper foils obtained by electrodeposition and coated with a monolayer of graphene. The initial foils contained a high proportion of twin boundaries, which provides both high strength and enhanced conductivity of such foils. The microstructure of the composites obtained from the foils was found to be homogeneous with an equiaxed grain size of about 300 nm. Despite the decrease in the proportion of coherent twin boundaries in the process of high-pressure torsion, the mechanical properties of the composite increased, which is apparently due to dynamic recrystallisation and the formation of a homogeneous fine-grained structure.

KEYWORDS

Copper/graphene composite; high pressure torsion; microstructure; mechanical properties.

**МИКРОСТРУКТУРА КОМПОЗИТА МЕДЬ/ГРАФЕН, ПОЛУЧЕННОГО
МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ**

*Галия Фердинандовна Корзникова ^a, Айнур Фардатович Алетдинов,
Гульнара Рашитовна Халикова*

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия

^a korznikova@anrb.ru

АННОТАЦИЯ

Медноматричные композиты с графеном перспективны для широкого спектра применений, связанных с их хорошей тепло- и электропроводностью. Однако существуют важные проблемы при синтезе композитов медь/графен, связанные с плохой дисперсией графена в матрице и слабой межфазной связью. Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением дает возможность получать объемные образцы с нанокристаллической структурой.

рой без пор и загрязнений. Этот метод был успешно использован для изготовления композита Cu/графен из тонких медных фольг, полученных электроосаждением и покрытых монослоем графена. Исходные фольги содержали высокую долю двойниковых границ, что обеспечивает как высокую прочность, так и повышенную проводимость таких фольг. Микроструктура полученных из фольг композитов оказалась однородной с равноосным размером зерна около 300 нм. Несмотря на снижение доли когерентных двойниковых границ в процессе кручения под высоким давлением механические свойства композита повысились, что связано, по-видимому, с динамической рекристаллизацией и формированием однородной мелкозернистой структуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Композит медь/графен; кручение под высоким давлением; микроструктура; механические свойства.

Введение

Технический прогресс в современной электронике приводит к миниатюризации высокопроизводительных электронных устройств для повышения доступности и удобства пользователя. Такие устройства требуют эффективного рассеивания тепла и высокой проводимости, чтобы избежать преждевременных отказов, что затруднительно из-за ограничений компактной конструкции. При разработке материалов с высокой энергоэффективностью во многих случаях требуется одновременно высокая электропроводность и высокая механическая прочность. Среди всех металлов медь занимает второе место по электро- и теплопроводности после серебра. Однако чистая медь имеет низкую прочность и твердость. Прочность чувствительна к микроструктуре и химическому составу, и наиболее известными подходами к упрочнению металлов являются легирование, измельчение зерна и деформационная обработка. Однако при легировании, как за счет образования твердого раствора, так и упрочнения второй дисперсной фазой, электропроводность снижается. Например, легирование чистой меди может повысить предел текучести в два-три раза, но электропроводность медных сплавов составляет всего половину от чистой меди или даже ниже [1]. Упрочнение измельчением зерна и деформационное упрочнение, по сути, заключаются в ограничении распространения

и перемещения решеточных дислокаций, которые являются носителями пластической деформации [2]. Фактически все эти подходы основаны на модуляции микроструктуры путем введения в металлы таких дефектов, как границы зерен, дислокации, границы фаз, атомы растворенных веществ и вторые фазы, чтобы затруднить движение дислокаций. В то же время такие дефекты увеличивают рассеяние проводящих электронов и уменьшают длину свободного пробега электронов, и, таким образом, увеличивают электрическое сопротивление металла. Таким образом, все варианты, разработанные для объединения прочности и проводимости, страдают от снижения электропроводности, в то время как прочность увеличивается [3, 4]. Для создания высокопрочного и высокопроводящего образца необходимо сформировать подходящую микроструктуру, в которой движения дислокаций эффективно блокируются, и в то же время рассеяние проводящих электронов сводится к минимуму. Известно, что границы двойников (ГД) представляют собой особый вид когерентной границы, которая включает атомные плоскости по обе стороны границы, расположенные зеркально-симметричным образом, способные блокировать движение дислокаций, как обычные высокоугловые границы зерен и повышать механическую прочность материала, но электрическое сопротивление таких когерентных границ примерно на порядок ниже, чем у обычных высокоугловых границ зе-

рен [4, 5]. Высокопрочные образцы медной фольги с нанодвойниками были успешно изготовлены с использованием импульсного электроосаждения [4]. Позднее в [7, 8] сообщалось, что механические свойства этих образцов в первую очередь контролируются толщиной нанодвойников и прочность увеличивается с уменьшением толщины двойников аналогично соотношению Холла-Петча для зернограничного упрочнения в нанокристаллических металлах [9]. Оказалось, что предел текучести достигает максимального значения около 1000 МПа, когда толщина нанодвойников составляет 15 нанометров, а затем при меньших толщинах следует уменьшение прочности. Однако толщина высокопрочных электроосажденных фольг не превышает 30 мкм [7].

Одним из методов изготовления объемных металлматричных композитов является интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением (КВД) [9]. В процессе КВД образец в форме диска подвергается одновременно кручению и сдвиговой деформации под высоким гидростатическим давлением. Этот метод позволяет деформировать образцы при комнатной температуре до значительной суммарной степени деформации. Преимуществом КВД является отсутствие вносимых загрязнений и возможность варьирования условий деформации (давление, скорость деформации, число оборотов). Данный метод позволяет целенаправленно изменять микроструктуру материалов, тем самым добиваясь у них существенного повышения комплекса свойств. Целью настоящей работы было развитие метода КВД для изготовления композита с Cu-матрицей, армированного графеном, путем прессования тонких медных фольг, покрытых монослоем графена. Данное исследование включает в себя не только исследование микроструктуры, но и исследования микротвердости и испытания на растяжение. Для сравнения были исследованы также консолидированные образцы чистой медной фольги без графенового покрытия.

1. Материал и методы исследования

Исходным материалом являлись медные фольги, полученные электроосаждением. Часть фольг имела двухстороннее покрытие монослоем графена. Толщина фольг составляла 20 мкм. Круглые пластины диаметром 10 мм были вырезаны из фольг методом электроэрозионной обработки. Стопки из 18 круглых пластин размещали в установке типа наковален Бриджмена и подвергали деформированию при комнатной температуре при давлении 5 ГПа на 5 оборотов, со скоростью вращения 2 оборота в минуту. Монолитные образцы в форме дисков без трещин, пор и других дефектов после обработки КВД имели толщину около 0,1 мм. Этот метод был ранее апробирован для получения ряда металлматричных композитов [10–13]

Микроструктурный анализ проводили на участке в 3 мм от центра образцов с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3LMH с детекторами обратно рассеянных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ. EBSD-анализ был проведен на том же сканирующем электронном микроскопе с использованием системы микроанализа OXFORD HKL Channel 5. Из-за ограниченной угловой точности EBSD границы с разориентацией ниже 2° были исключены из рассмотрения. Для различения малоугловых границ (LAB) и высокоугловых границ зерен (HAB) был применен порог в 15° . LAB и HAB на картах EBSD изображены красными и черными линиями соответственно, а границы двойников (ТВ) изображены зелеными линиями. Для повышения надежности данных EBSD мелкие зерна, состоящие из пяти или менее пикселей, были автоматически удалены с карт.

Исследования просвечивающей электронной микроскопии проводились на микроскопе JEM 2100 Plus при ускоряющем напряжении 200 кВ. Рентгеновский дифракционный анализ проводился на рентгеновской дифракционной системе высокого разрешения Rigaku Ultima IV с использованием излучения Cu-K α .

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Микроструктура исходного материала.

Типичные характеристики микроструктуры исходной Cu фольги, покрытой монослоем графена, приведены на рис. 1. На карте EBSD инверсной полюсной фигуры (IPF) для нормального направления, показанной на рис. 1, а, видно, что исходная микроструктура была достаточно неоднородной. Среднее сечение по высокоугловым границам составило 0,9 мкм с соотношением сторон 1,03. Большинство границ зерен имели высокоугловый характер (доля HAB

составила 90%). На карте границ зерен преобладали двойниковые границы (рис. 1, б). Распределение углов разориентации отличается от случайного теоретического что обозначено сплошной черной линией на рис. 1, в, а доля двойниковых границ $\Sigma 3$ (ТВ) составляет 38% (рис. 1, в). Материал имел слабую почти кубическую текстуру (рис. 1, г). Аналогичный набор характеристик микроструктуры был получен для Cu фольги без покрытия, что позволяет предположить, что монослой графена на поверхности не влияет на объемные микроструктурные особенности.

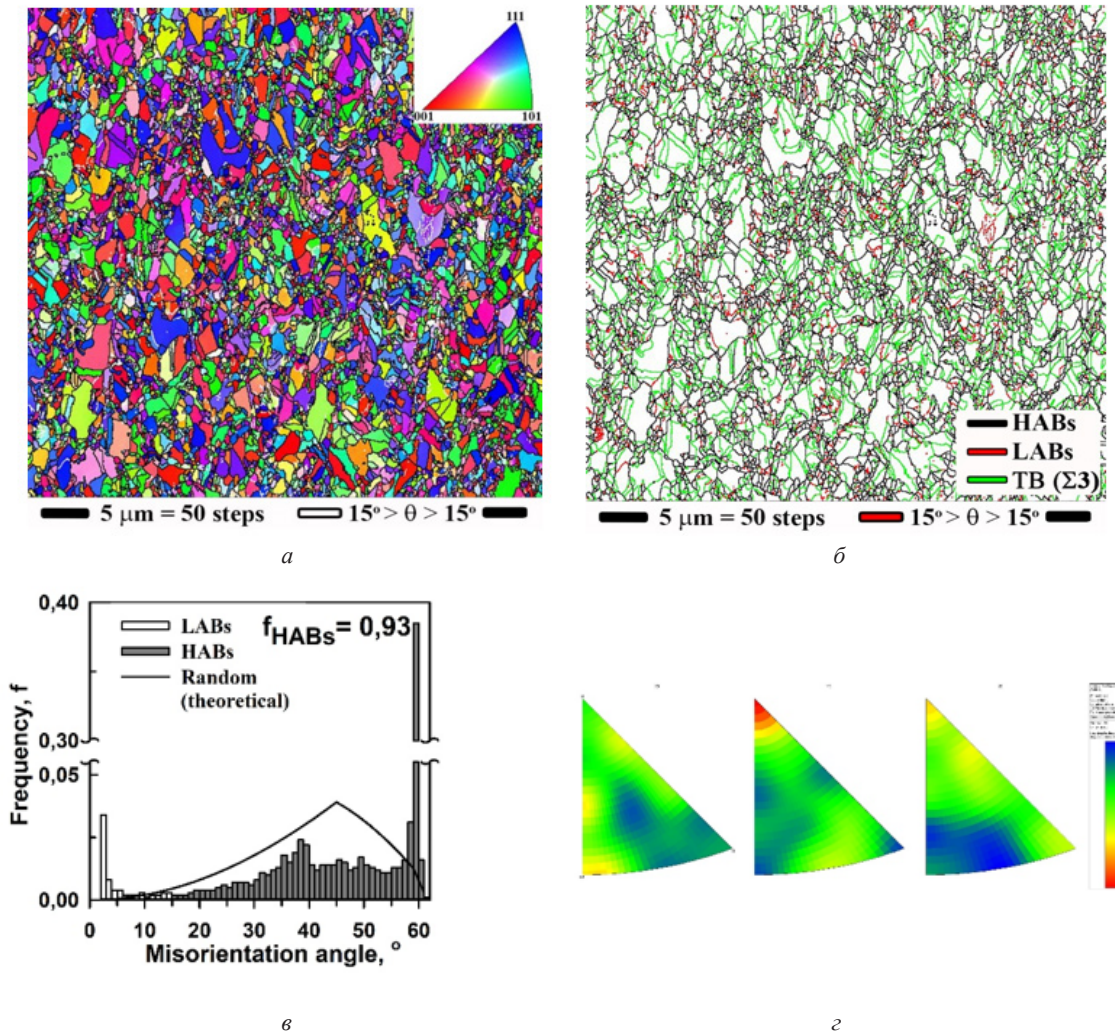


Рис. 1. Характеристика микроструктуры медной фольги с монослоем графена до КВД: а – карта обратных полюсных фигур EBSD; б – карта границ зерен EBSD; в – распределение углов разориентации; и г – (1 0 0), (1 1 0) и (1 1 1) полюсные фигуры, иллюстрирующие текстуру

Fig. 1. Microstructure characterization of the copper foil with graphene monolayer prior to HPT: а – EBSD inverse-pole-figure map; б – EBSD grain-boundary map; в – misorientation angle distribution; and г – (1 0 0), (1 1 0) and (1 1 1) pole figures illustrating texture

2.2. Микроструктура композитов после интенсивной пластической деформации методом КВД.

В образцах, обработанных методом КВД, были отмечены некоторые микроструктурные особенности. Они включали размер зерна, границы субзерен, двойники и текстуру.

На рис. 2 представлены результаты EBSD-анализа композита Cu/графен. Микроструктура композита Cu/графен стала однородной, средний размер зерна составил около 0,35 мкм при соотношении сторон 1,27 (рис. 2, а, б). Доля высокоугловых границ снизилась до 0,83, а границы двойников практически исчезли (рис. 2, в). Как видно на рис. 2, г, после 5 оборотов при КВД формируется типичная текстура сдвига с присутствием всех компонентов сдвига.

Известно, что КВД по сути является процессом сдвига [9, 14] и текстура проявляется более заметно и отличается от текстуры в исходной фольге. Это типичный случай для ГЦК-материалов со средним значением энергии дефекта упаковки (~78 мДж/м² в чистой Cu), поскольку известно, что для большинства этих материалов текстура нестабильна и неоднородна по радиусу диска на ранних стадиях деформации сдвига, но становится более однородной с ростом деформации примерно до 5 оборотов наковален из-за сильного измельчения зерна в ходе динамической рекристаллизации и активации зернограничного скольжения [14].

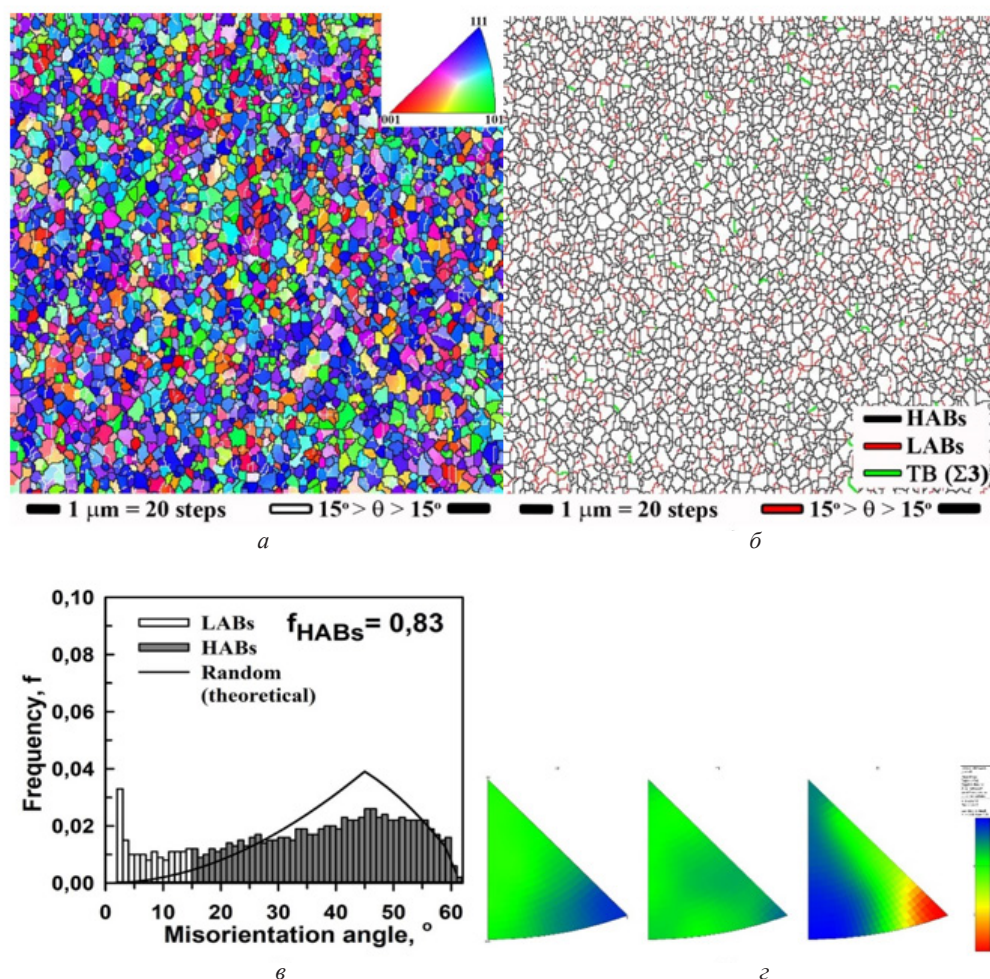


Рис. 2. Характеристика микроструктуры композита Cu/графен, изготовленного методом RDL: а – карта обратных полюсных фигур EBSD; б – карта границ зерен EBSD; в – распределение углов разориентации; и г – (1 0 0), (1 1 0) и (1 1 1) полюсные фигуры, иллюстрирующие текстуру

Fig. 2. Microstructure characterization of Cu/graphene composite fabricated by HPT: а – EBSD inverse-pole-figure map; б – BSD grain-boundary map; в – misorientation angle distribution; and г – (1 0 0), (1 1 0) and (1 1 1) pole figures illustrating texture

Аналогичные результаты EBSD-анализа были получены для подвергнутых КВД Cu фольг без покрытия (рис. 3). Средний размер зерна был около 0,39 мкм с соотношением сторон 1,98 (рис. 3, а, б). Доля высокоугловых границ (рис. 3, в) и текстура (рис. 3, г) были аналогичны таковым в композите Cu/графен. Было обнаружено, что размер зерна композита Cu/графен был немного

меньше, чем у чистой Cu. В обоих образцах интенсивная пластическая деформация во время обработки НРТ вызывает трансформацию зерен за счет действия различных систем скольжения и двойникования, что приводит к измельчению и удлинению зерен наряду с образованием внутризеренных субструктур, что увеличивает долю малоугловых границ.

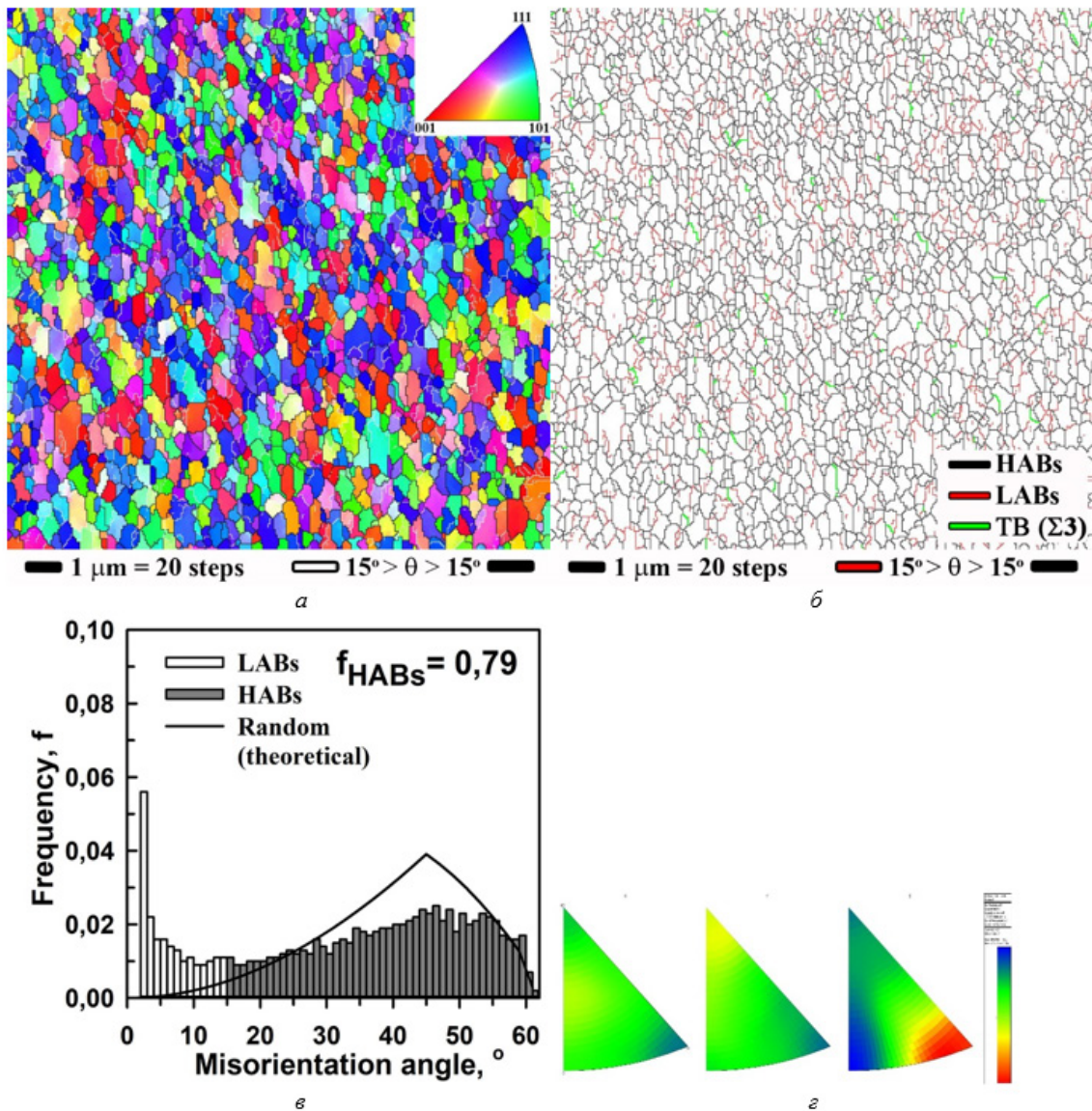


Рис. 3. Характеристика микроструктуры массивного образца Cu без графена, изготовленного методом КВД: а – карта обратных полюсных фигур EBSD; б – карта границ зерен EBSD; в – распределение углов разориентации; и г – (1 0 0), (1 1 0) и (1 1 1) полюсные фигуры, иллюстрирующие текстуру

Fig. 3. Microstructure characterization of bulk Cu sample without graphene after HPT processing: а – EBSD inverse-pole-figure map; б – EBSD grain-boundary map; в – misorientation angle distribution; and г – (1 0 0), (1 1 0) and (1 1 1) pole figures illustrating texture

Следует отметить, что доля двойниковых границ $\Sigma 3$ резко снизилась после обработки КВД. Этот эффект может быть вызван деформационным отклонением от точного соотношения двойник/матрица и, таким образом, трансформацией двойниковых границ в случайные большеугловые границы во время деформации и развития динамической рекристаллизации в ходе деформирования. Однако необходимо учитывать, что шаг сканирования при EBSD-анализе составлял 50 нм и нанодвойники толщиной около 10–20 нм не могут быть надежно обнаружены в образцах. Поэтому более детальное исследование фольги было проведено с помощью просвечивающего электронного микроскопа при больших увеличениях, что позволило выявить некоторое количество нанодвойников толщиной 10–20 нм в Cu-фольгах (рис. 4, а) и незначительное количество нанодвойников в композитах, полученных КВД, как с графеном (рис. 4, б), так и без графена (рис. 4, в). Таким образом, исследования с помощью электронной микроскопии, как сканирующей, так и просвечивающей, указывают на значительное снижение доли двойниковых

границ и показывают, что в образцах во время обработки КВД развивались субграницы.

Кроме того, наблюдения методом просвечивающей микроскопии образцов после КВД (рис. 4, б, в) указывают на действие непрерывной динамической рекристаллизации в ходе деформирования. В некоторых областях микроструктуры наблюдалась высокая плотностью дислокаций и резкие контуры экстинкции, указывающими на значительные упругие деформации, которые часто встречаются в материалах, подвергавшихся интенсивной пластической деформации [9]. В других областях (рис. 4, б, в) были обнаружены свободные от дислокаций, рекристаллизованные зерна, демонстрирующие достаточно однородный контраст и содержащие двойники отжига (указаны стрелками).

Расчеты уширения линий рентгеновской дифракции (XRD) позволили количественно оценить некоторые структурные характеристики и подтвердить значительные упругие деформации после КВД. В табл. 1 представлены данные о параметре решетки, областях когерентного рассеяния и микродеформациях образцов, обработанных КВД.

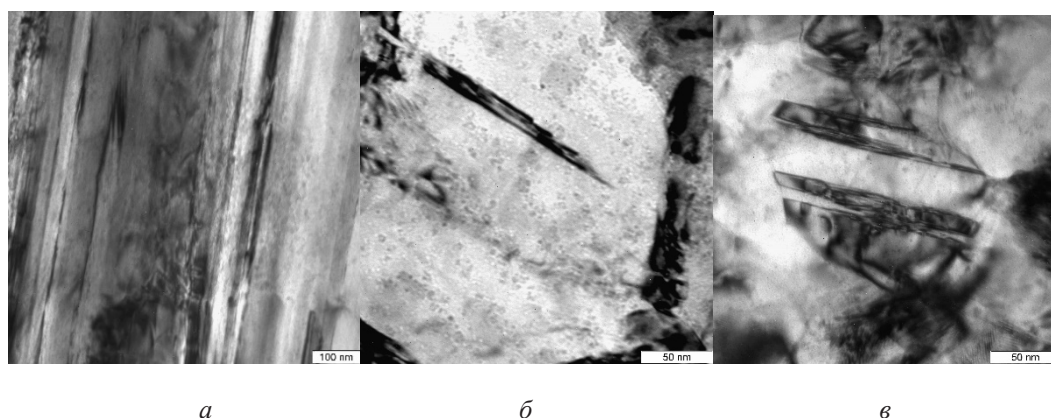


Рис. 4. Светлопольные изображения, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа: медная фольга (а); композит Cu/графен (б); образец композита Cu без графена после деформирования КВД (в)

Fig. 4. Light-field images obtained using a transmission electron microscope: copper foil (a); Cu/graphene composite (b); Cu composite sample without graphene after HPT processing (c)

Таблица 1. Результаты рентгеноструктурного анализа

Table 1. X-ray diffraction analysis results

Образец / Sample	Параметр решетки, а (нм) / Lattice parameter, a (nm)	Область когерентного рассеяния (нм) / Coherent scattering regions, CSR (nm)	Микронапряжения / Microstrain, ϵ , %
КВД, Медь/графен / НРТ Cu/Graphene	0,3616984±0,0000052	60,63±0,47	$\epsilon = 0,21587$
КВД, Медь / НРТ Pure Cu	0,3616962±0,0000049	68,29±0,39	0,17972

Присутствие графена увеличивает микронапряжения и параметр решетки и уменьшает области когерентного рассеяния в обработанной КВД Cu. В соответствии с теорией дислокаций существует пропорциональность между энергией дефекта упаковки (ЭДУ) и деформацией решетки [15], которая использовалась для оценки эффективной ЭДУ. По сравнению с чистым наноккомпозитом Cu, композит Cu/графен имеет более высокую эффективную ЭДУ. Хорошо известно, что увеличение энергии дефекта упаковки способствует адаптации пластической деформации путем активации достаточных систем скольжения дислокаций в материалах и характеризуется разупрочняющим поведением при больших деформациях из-за быстрой аннигиляции дислокаций, их перегруппировки в субзерна с малоугловыми разориентировками, а затем их трансформации в большеугловые границы с образованием сверхмелких зерен [14]. Напротив, уменьшение эффективной ЭДУ может способствовать деформации путем механического двойникования. Таким образом, результаты анализа микроструктуры показывают, что КВД медных фольг с покрытием графена, а также без графена обеспечивает значительное измельчение зерна, но желаемые образцы с высокой долей наноразмерных двойников не были получены. Уменьшение доли границ двойников $\Sigma 3$ может быть связано с ограниченным вкладом двойникования в эволюцию микро-

структуры в настоящей работе из-за среднего значения эффективной ЭДУ. Однако необходимы дальнейшие исследования, чтобы подтвердить, оказывает ли ЭДУ определяющее влияние на механизм деформации при КВД меди или измельчение зерен является результатом мелкозернистой природы исходной ленты, полученной электролизом [16]. Настоящие результаты требуют дальнейших исследований, включая термическую обработку, поскольку отжиг может стимулировать образование большой доли границ двойникового типа.

Ранее нами было показано, что композиты, полученные методом КВД из медных фольг с покрытием графена, а также без графена обладают повышенной микротвердостью, а испытания на растяжение показали, что значение предела прочности на растяжение достигло 670 МПа при комнатной температуре при удлинении около 10% как в образцах с графеном, так и без графена [17]. Согласно большинству известных экспериментальных данных, композиты Cu/графен демонстрируют превосходную твердость, модуль Юнга по сравнению с соответствующими неармированными матрицами. Однако предел текучести и предел прочности на растяжение при комнатной температуре таких композитов невысоки (200–400 МПа) [18–20], поскольку основным методом получения таких композитов остается консолидация исходных порошковых компонен-

тов, полученных разломом, что неизбежно вносит загрязнение и окисление в конечный композит. В ультрамелкозернистых образцах чистой меди, полученных деформационным способом, в частности, методом равноканального углового прессования, значения предельной прочности, достигают 485 МПа [21]. В нашем случае кручение под высоким квазигидростатическим давлением привело к формированию более однородной ультрамелкозернистой структуры без загрязнений и пор, что обеспечило высокие прочностные свойства композита с графеном и без графена.

Выводы

Обработка кручением под высоким давлением является эффективным подходом для синтеза высококачественного объемного медноматричного композита, армированного графеном. Кручение под давлением значительно уменьшает средний размер зерна, но желаемая микроструктура с большой долей нанодвойников не достигается такой деформационной обработкой. Измельчение зерна в основном связано с динамической рекристаллизацией. Однородная мелкозернистая структура, с небольшой долей малоугловых границ и слабой кубической текстурой, обеспечивает высокую прочность на разрыв и достаточную пластичность в образцах медь/графен и чистой меди. Поскольку медь широко используется в качестве конструкционного материала для тепловых трубок, теплоотводов и радиаторов для интеллектуальных электронных устройств, объемные композиты медь/графен с высокой прочностью и достаточной пластичностью потенциально могут служить эффективными материалами для электронного оборудования высокой мощности.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-29-00863.

The work was carried out within the framework of Russian Science Foundation Project No. 23-29-00863.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qingzhong M., Yanfang L., Yonghao Z., A review on copper alloys with high strength and high electrical conductivity, *Journal of Alloys and Compounds // Journal of Alloys and Compounds*, 990, 174456 (2024). DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174456
2. Хафизова, Э. Д., Поленок, М. В., Салихов, А. И., Исламгалиев, Р. К. Структура и механические свойства цинкового сплава Zn-Ag-Cu после интенсивной пластической деформации кручением. *Materials. Technologies. Design*, 4(3(9)), 66–72. (2022) DOI: 10.54708/26587572_2022_43966
3. Champion Y., Couzine J.P., Tusseau Nenez S., Bréchet Y., Islamgaliev R.K., Valiev R. High Strength and Electrical Conductivity of UFG Copper Alloys // *Mater. Sci. Forum*, 667-669, 755-759 (2010).
4. Lei Lu, Yongfeng Shen, Xianhua Chen, Lihua Qian, K. Lu Ultrahigh Strength and High Electrical Conductivity in Copper // *SCIENCE* 304, 422-426 (2004). DOI: 10.1126/science.1092905
5. Christian J. W., Mahajan S. Deformation Twinning // *Progress in Materials Science*, 39, 1-2, 1-157 (1995). DOI: 10.1016/0079-6425(94)00007-7
6. Lee K. P., Chen B. Y., Lin Y.Q., Hung Y.W., Hsu W.Y., Chen Y.H., Chen C. High-strength and high-conductivity nanotwinned Cu lightly doped with Ni // *Materials Science and Engineering: A*. 891, 145990 (2024) DOI: 10.1016/j.msea.2023.145990
7. Lu L., Chen X., Huang X., Lu K. Revealing the maximum strength in nanotwinned copper // *Science*, 323, 607-610 (2009). DOI: 10.1126/science.1167641
8. Chen J., Lei L., Ku L. Hardness and strain rate sensitivity of nanocrystalline Cu // *Scripta Mater*. 54, 1913–1918 (2006). DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.02.022
9. Zhilyaev, A.; Langdon, T. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // *Prog. Mater. Sci.*, 53, 893–979 (2008). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.03.002
10. Korznikova G., Kabirov R., Nazarov K., Khisamov R., Shayakhmetov R., Korznikova E., Khalikova G., Mulyukov R. Influence of Constrained High-Pressure Torsion on Microstructure and Mechanical Properties of an Aluminum-Based Metal Matrix Composite // *JOM*, 72, 2898–2911 (2020). DOI: 10.1007/s11837-020-04152-1
11. Корзникова Г.Ф., Хисамов Р.Х., Назаров К.С., Халикова Г.Р., Шаяхметов Р.У., Кабиров Р.Р., Тимиряев Р.Р., Корзникова Е.А., Назарова Т.И., Мулюков Р.Р. Механические свойства металломатричного композита на основе Al-Mg, полученного деформацией сдвига под давлением // *ЖТФ*, 94, 8 1347-1355 (2024).
12. Khisamov R.Kh., Khalikova G.R., Kistanov A.A., Korznikova G.F., Korznikova E.A., Nazarov K.S., Sergeev S.N., Shayakhmetov R.U., Timiryayev R.R., Yumaguzin Yu.M., Mulyukov R.R. Microstructure,

microhardness and work function of in-situ Al-Cu composite processed by mechanical alloying by means of high-pressure torsion // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 35, 1433-1444 (2023). DOI: 10.1007/s00161-022-01145-0

13. Nazarov K.S., Korznikova G.F., Khisamov R.Kh., Timiryayev R.R., Korznikova E.A., Khalikova G.R., Shayakhmetov R.U., Sergeev S.N., Kabirov R.R., Mulyukov R.R. Mechanical properties of Al-Nb in situ metal-matrix composites fabricated by constrained high pressure torsion at 10 GPa and subsequent annealing // *Letters on Materials*, 12 (4), 360-366 (2022).

14. Hiba A., Djamel B., Thierry B., Terence G. L., Texture evolution in high-pressure torsion processing // *Progress in Materials Science*, 125, 100886 (2022). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2021.100886

15. Reed R.P., Schramm R.E. Relationship between stacking fault energy and x-ray measurements of stacking fault probability and microstrain // *J. Appl. Phys.* 45, 4705 (1974). DOI:10.1063/1.1663122

16. Sadoun A.M., Abdallah A.W., Najjar I.M.R., Basha M., Elmahdy M. Effect of lattice structure evolution and stacking fault energy on the properties of Cu-ZrO₂/GNP nanocomposites // *Ceramics International*, 47(21), 29598-29606 (2021). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.07.129

17. Korznikova G., Aletdinov A., Khalikova G., Korznikova E. Achieving High Strength in Cu/Graphene Composite Produced by High Pressure Torsion // *Russian Metallurgy (Metally)*, 11, 1696-1699 (2023).

18. Hidalgo-Manrique, P., Lei, X., Xu, R. et al. Copper/graphene composites: a review. // *J Mater Sci*, 54, 12236-12289 (2019). DOI: 10.1007/s10853-019-03703-5

19. Papageorgiou D. G., Kinloch I. A., R. J. Young, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, *Progress in Materials Science*, Volume 90, 2017, Pages 75-127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>

20. Yang Y., Liang Y., He G., Luo P. Graphene core-shell structure guided functionalized interface to prepare high-strength, high-plasticity, and high-conductivity copper matrix composites // *Materials Science and Engineering: A*, 847, 143349 (2022). DOI: 10.1016/j.msea.2022.143349.

21. Lugo N., Llorca N., Cabrera J. M., Horita, Z. Microstructures and mechanical properties of pure copper deformed severely by equal-channel angular pressing and high pressure torsion // *Materials Science and Engineering: A*, 477 (1-2), 366-371 (2008). DOI:10.1016/j.msea.2007.05.083