

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.931

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.005

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ КРУЧЕНИЕМ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН МЕДИ И АЛЮМИНИЯ

Валерий Николаевич Даниленко¹, Лейла Ураловна Киеккужина², Юрий Анатольевич Лебедев³, Виль Даянович Ситдигов⁴

^{1,2} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

³ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, пр. Октября, 71, 450054, Уфа, Россия

⁴ ООО «РН-БашНИПИнефть», ул. Ленина 86/1, 450006, Уфа, Россия

¹ vdan@anrb.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3159-0894>

² leilamtm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0527-5641>

³ lebedev@anrb.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-8046>

⁴ SitdikovVD@bnpi.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9948-1099>

Аннотация. Методами растровой электронной микроскопии, рентгенофазового и энергодисперсионного анализа изучена структура и фазовый состав металломатричных композитов, полученных кручением под высоким давлением пластин Al и Cu с различной укладкой слоев: 6Cu-5Al - и 6Al-5Cu. Образцы деформировали кручением под высоким давлением 6 ГПа, на 5 оборотов со скоростью 1 об/мин. Показано, что образец с укладкой пластин 6Al-5Cu имеет более однородную структуру, чем образец с укладкой 6Cu-5Al. Процесс перемешивания в образце 6Al-5Cu протекает более интенсивно во все объеме образца, а в образце 6Cu-5Al только на краю. Рентгенофазовый и энергодисперсионный анализ показал, что фазовый состав исследованных образцов заметно отличается. Интерметаллидные фазы AlCu, Al₂Cu, Al₄Cu, а также твердый раствор алюминия в меди присутствуют в образце 6Al-5Cu, основу составляет алюминий и медь. В образце 6Cu-5Al также наблюдаются аналогичные интерметаллидные фазы, а основу составляет медь и твердый раствор алюминия в меди. Микротвердость исследованных образцов, измеренная в поперечном сечении, значительно выше микротвердости исходных металлов. Микротвердость формируется в зависимости от полученной структуры и фазового состава исследованных образцов.

Ключевые слова: металломатричные композиты, кручение под высоким давлением, многослойные образцы, интенсивная пластическая деформация, интерметаллидные соединения, твердые растворы

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-19-00347 и частичной поддержке государственного задания ИПСМ РАН № 122011900426-4. Исследования электронной микроскопии проводились на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов». Рентгенофазовый анализ проводился на базе РЦКП УФИЦ РАН «Агидель».

Для цитирования: Даниленко В.Н., Киеккужина Л.У., Лебедев Ю.А., Ситдигов В.Д. Структура и фазовый состав металломатричных композитов, полученных кручением под высоким давлением многослойных пластин меди и алюминия // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 56-66. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.005.

Original article

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF MULTILAYER METAL MATRIX COMPOSITE PRODUCED BY HIGH PRESSURE TORSION OF ALUMINUM AND COPPER PLATESValeriy N. Danilenko¹, Leila U. Kiekkuzhina², Yuriy A. Lebedev³, Vill D. Sitdikov⁴^{1,2} Institute for Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences, Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia³ Institute of Molecule and Crystal Physics UFRC of the Russian Academy of Sciences, Pr. Oktyabrya, 71, Ufa, 450054, Russia⁴ LLC "RN-BashNIPIneft" Lenina Str., 86/1, Ufa, 450006, Russia¹ vdan@anrb.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3159-0894>² leilamtm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0527-5641>³ lebedev@anrb.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-8046>⁴ SitdikovVD@bnipti.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9948-1099>

Abstract. The structure and phase composition of metal matrix composites obtained by high-pressure torsion of Al and Cu plates with different layer arrangements: 6Cu-5Al and 6Al-5Cu were studied using scanning electron microscopy, X-ray diffraction and energy dispersive analysis. The samples were deformed by high-pressure torsion of 6 GPa for 5 revolutions at a speed of 1 rpm. It was shown that the sample with the 6Al-5Cu plate arrangement has a more uniform structure than the sample with the 6Cu-5Al arrangement. The mixing process in the 6Al-5Cu sample occurs more intensively throughout the entire volume of the sample, while in the 6Cu-5Al sample it occurs only at the edge. X-ray diffraction and energy dispersive analysis showed that the phase composition of the studied samples differs significantly. Intermetallic phases AlCu, Al₂Cu, Al₄Cu₉, as well as a solid solution of aluminum in copper are present in the 6Al-5Cu sample, the basis is aluminum and copper. Similar intermetallic phases are also observed in the 6Cu-5Al sample, and the basis is copper and a solid solution of aluminum in copper. The microhardness of the studied samples, measured in the cross section, is significantly higher than the microhardness of the original metals. Microhardness is formed depending on the obtained structure and phase composition of the studied samples

Keywords: metal matrix composites, high pressure torsion, severe plastic deformation, intermetallic compounds, solid solutions.

Acknowledgements: The work was supported by the RSF grant №22-19-00347 and partially supported by the state assignment of the IMSP RAS №122011900426-4. Electron microscopy studies were carried out on the facilities of the shared services center of IMSP RAS "Structural and Physical-Mechanical Studies of Materials". XRD studies were carried out on the facilities of regional shared services center of UFRCRAS "Agidel".

For citation: Danilenko V.N., Kiekkuzhina L.U., Lebedev Y.A., Sitdikov V.D. (2025). Structure and phase composition of multilayer metal matrix composite produced by high pressure torsion of aluminum and copper plates. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 56-66. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.005.

Введение

Твердофазные реакции являются одним из основных методов для получения материалов с улучшенными свойствами [1]. Твердофазные реакции протекающие под действием деформации позволяют получать твердые материалы с уникальным комплексом свойств. Интенсивная пластическая деформация (ИПД) открывает в этом направлении большие возможности [2]. Как показано в [3] деформация кручением под высоким давлением (КВД) хорошо подходит для получения композитов. Деформация разнородных материалов позволяет получать металломатричные композиты [4-6]. Для этой цели используют стопку разнородных металлов, где число слоев $n \geq 3$, причем одного металла всегда

на единицу больше. Если взять алюминий и медь, то можно использовать два типа укладки: Al-Cu-Al и Cu-Al-Cu [7]. Деформацией КВД в бинарных системах Al-Nb [8], Al-Mg [9], Al-Cu [10], Cu-Al [4], и др. были получены металломатричные композиты.

В настоящее время появились работы, где методом КВД деформировали образцы, отличающиеся не только составом, но и наличием дальнего порядка. В работе [11] деформировали трехслойную стопку, где аморфную ленту состава Fe₅₀Ni₃₃B₁₇ положили между двумя кристаллическими лентами состава Fe₅₀Ni₂₅Cu₂₅. Было показано, что при совместной деформации КВД происходит консолидация двух разнородных слоев, которая растет от центра к краю образцов. Деформация трехслойных сто-

пок для получения металломатричных композитов в настоящее время используется наиболее часто, в тоже время имеются работы, где для получения более однородной структуры деформируют многослойные стопки пластин двух металлов. В работах [8,12] проведено сравнение формирования трех и пятислойных стопок в бинарных системах Al-Nb и Al-Mg соответственно. В обоих бинарных системах в пятислойных стопках была получена более однородная структура, чем в трехслойных стопках. В [13] деформировали КВД трехслойный образец Al-Ti-Al, после 50 оборотов, наблюдали образование интерметаллидных соединений (ИМС) Al_3Ti и $AlTi_{33}$. После деформации КВД пятислойного образца Al-Ti-Al-Ti-Al [14] на 50 оборотов наблюдали образование более широкого набора ИМС: $AlTi$, Al_3Ti и $AlTi_3$, а также твердые растворы Al и Ti.

Как показано выше деформация КВД стопки разнородных металлов из пяти дисков улучшает процесс формирования однородной структуры. В работе [15] для КВД использовали многослойный образец из 19 медных и 18 танталовых фольг. В несмешивающейся системе Cu-Ta была получена достаточно однородная микроструктура с высокой микротвердостью по Виккерсу. Полученная микроструктура чрезвычайно стабильна даже после отжига при температуре 1000 С в течение 1 ч. Микротвердость после такой термообработки снижается всего на 25%.

Фазовый переход ГПУ – ГЦК наблюдали при деформации КВД многослойного образца Al-Zn состоящего из 13 дисков Al и 12 дисков Zn под давлением 3 ГПа на 50 оборотов со скоростью вращения 1 об/мин [16].

Влияние деформации КВД на формирование микроструктуры изучали в системах: Ag-Cu, которая является примером практически несмешивающейся системы и Al-Cu, которая частично смешивается. Многослойные стопки тонких фольг для деформации состояли из чередующихся 11 фольг Cu и 10 фольг Ag или Al. Образцы деформировали под давлением 4.5 ГПа со скоростью 1 об/мин вращая на 5 оборотов для Ag-Cu и 3 оборота для Al-Cu. Визуализацию деформации многослойных систем Ag-Cu и Al-Cu проводили с помощью трехмерной (3D) рентгеновской синхротронной томографии. Эксперимент и численное моделирование показало, что в системе Ag-Cu происходит расслоение, вызванное упаковкой слоев, а в систе-

ме Al-Cu наблюдается образование вихрей [17].

В [18] показано, что при деформации КВД двадцати пяти слойных образцов Al-Cu и Al-Ni наблюдали образование вихре-подобной структуры. Образование вихрей позволяет получать более однородную структуру, которая улучшает механические свойства получаемых композитов [8,15].

В работе [19], предложен новый метод ИПД, названный авторами, аккумулирующим КВД. Суть метода заключается в добавлении новой операции в процесс традиционного КВД. Образец деформируют на один, два оборота затем разрезают его на четыре части и складывают полученные части друг на друга и снова деформируют на один, два оборота и снова разрезают на четыре части. Таких циклов может быть несколько. В завершении, после очередного цикла, стопку еще деформируют на необходимое число оборотов. Метод аккумулирующего КВД привел к более существенной трансформации структуры аморфного сплава на основе Zr, чем традиционное КВД с тем же числом оборотов. Если для деформации аккумулирующим КВД использовать разнородные металлы, то начиная со второго цикла деформируется многослойный образец. Использование этого метода для деформации изначально трех слойных стопок Cu-Al-Cu приводит к значительно более однородной структуре, чем традиционной КВД при одинаковом числе оборотов и формированию металломатричного композита с улучшенными свойствами [20-22].

Целью данной работы является исследование структуры, фазового состава и механических свойств металломатричных композитов, полученных из многослойных пластин меди и алюминия.

Материалы и методики эксперимента.

Листы технической чистой алюминия и меди толщиной 0,2 мм использовали для вырезания пластин размерами 7×7 мм. Для получения исходных стопок образцов использовали два способа укладки: Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu (6Cu-5Al) и Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al-Cu-Al (6Al-5Cu). Обработку КВД одиннадцати слойных стопок проводили при комнатной температуре в неограниченных условиях (плоские бойки). Было приложено давление 6 ГПа и деформация кручением на 5 оборотов со

скоростью вращения 1 об/мин. Были получены дискообразные образцы толщиной: 6Cu-5Al – 0.18 мм и 6Al-5Cu – 0.21 мм.

Исследование структуры и химического состава полученных образцов применяли растровый электронный микроскоп (РЭМ) Tescan Vega 3 SBH с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА). Для удобства анализа поперечное сечение полученных образцов исследовали в трех зонах: центр, середина радиуса и край полученных образцов.

Удельную длину межфазных границ Al/Cu измеряли по изображениям полученным в РЭМ, как отношение общей длины межфазных границ к площади анализируемой области.

Для нахождения фазового состава полученные образцы исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемку образцов проводили с плоскости полученных образцов на дифрактометре Bruker D8 Advance при ускоряющем напряжении $U = 40$ кВ и токе $I = 40$ мА, используя $\text{Cu-K}\alpha$ излучение в интервале углов рассеяния 2θ от 15° до 140° с шагом $0,02^\circ$, в геометрии Брегга – Брентано.

Качественный фазовый анализ, проводили с использованием базы рентгеновских данных PDF-2 в программном пакете EVA, а количе-

ственное содержание фаз определяли методом Ритвельда в программе TOPAS v. 4.2.

Микротвердость измеряли по методу Виккерса в поперечном сечении образцов. Применяя микротвердомер AFFRI DM8A с нагрузкой 10 г и временем выдержки 10 с. Среднее значение микротвердости в точке определяли по результатам 6 измерений с доверительной вероятностью 95%.

Результаты эксперимента и обсуждение

На РЭМ изображениях показана макро-структура поперечного сечения полученных образцов (рис. 1). Как в образце 6Cu-5Al (рис. 1 а), так и в образце 6Al-5Cu (рис. 1 б) наблюдаются элементы структуры со светлым и темным контрастом.

В образце 6Cu-5Al сравнительно небольшая доля элементов структуры с темным контрастом, и эти элементы структуры в центре образца более крупные. По направлению к краю образца они становятся мельче и встречаются чаще. В образце 6Al-5Cu элементов структуры с темным контрастом наблюдается больше, и они распределены более однородно по всему объему по сравнению с образцом 6Cu-5Al.

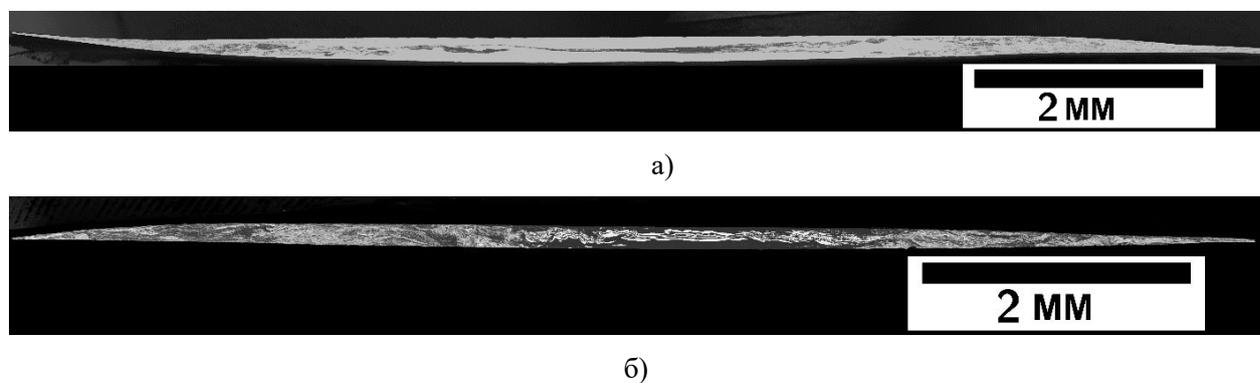


Рис. 1. Макроструктура деформированных многослойных образцов: а) 6Cu-5Al и б) 6Al-5Cu

Fig. 1. Macrostructure of the samples after deformation: a) 6Cu-5Al and b) 6Al-5Cu

Микроструктура и композиционные карты образцов 6Cu-5Al и 6Al-5Cu представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Согласно композиционным картам в изображении структуры светлomu контрасту соответствуют участки богатые медью, а темному — богатые алюминием.

В центре образца 6Cu-5Al (рис. 2а) наблюдается трехслойная структура: между слоями

меди находится слой, состоящий из алюминия с вкраплениями богатыми медью. В середине радиуса образца наблюдаются равномерно распределенные участки богатые алюминием (рис. 2б), что показывает заметное перемешивание слоев меди и алюминия. На краю образца (рис. 2в) участки богатые алюминием имеют существенно меньший размер, более однородное распределение, а их контраст стал менее ярким.

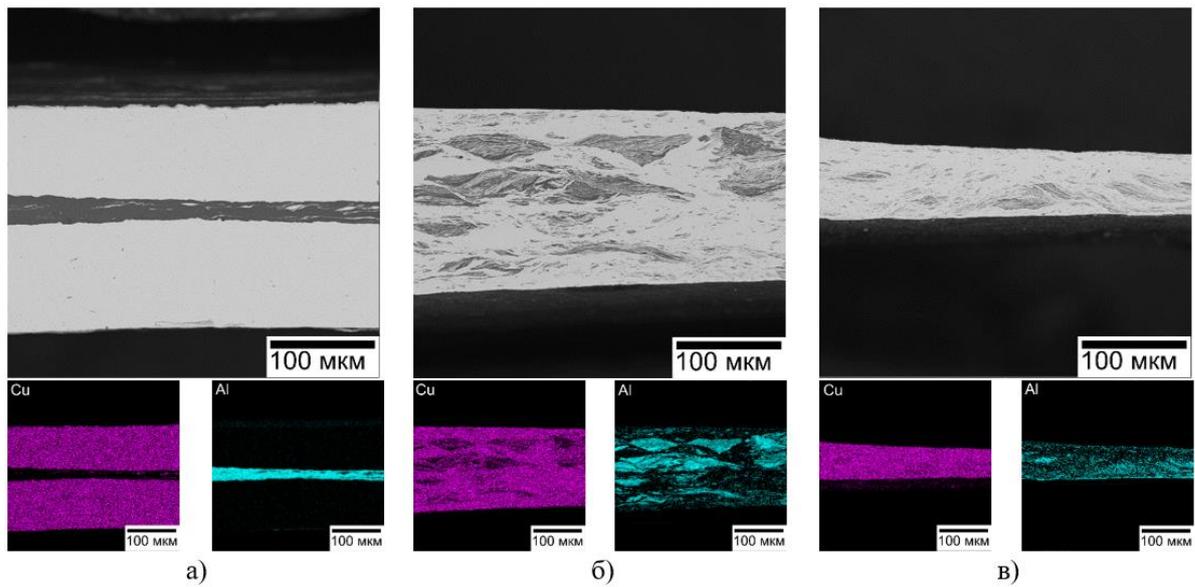


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения образца 6Cu–5Al в зонах центра (а), середины радиуса (б) и края (в) и соответствующие карты состава.

Fig. 2. Microstructure in the cross section of 6Cu–5Al in zones of the center (a), mid–radius (b) and edge (c), and respective elemental compositional maps

В центре образца 6Al–5Cu наблюдаются отдельные включения меди и четко различимые слои меди, которые изгибаются, и начинают разрываться по направлению к краю (рис. 3а). В зоне середины радиуса наблюдается заметно более однородная структура, состоящая из тон-

ких светлых (насыщенных медью) и темных (насыщенных алюминием) структурных элементов (рис. 3б). На краю образца (рис. 3в) участки богатые алюминием занимают большее пространство и имеют более яркий контраст, чем на изображении середины радиуса.

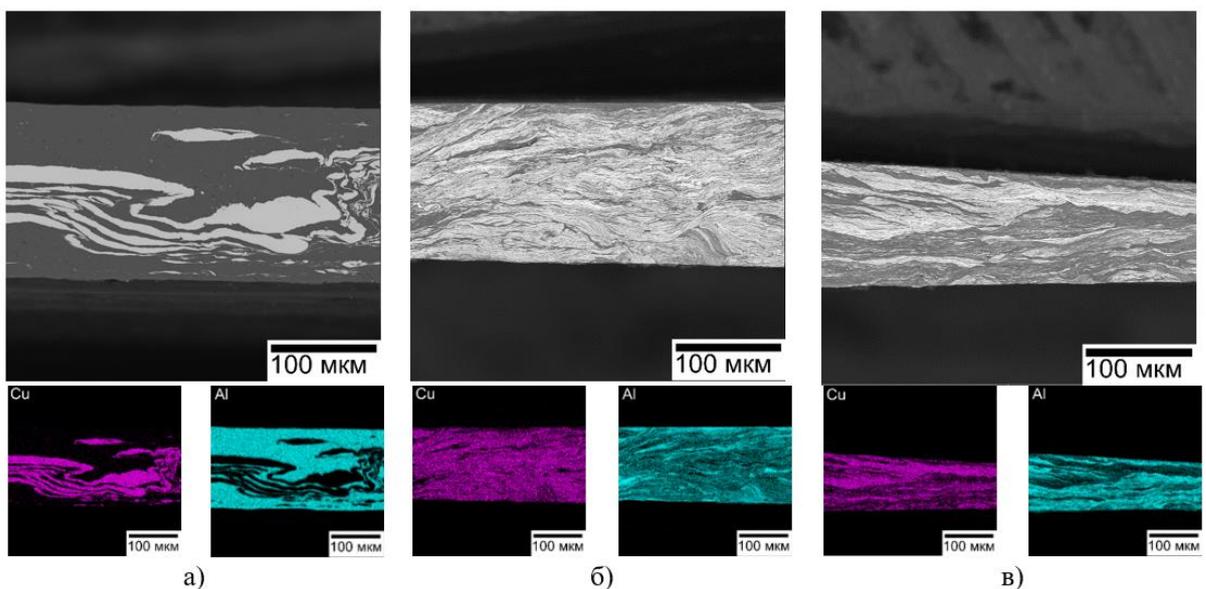


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения образца 6Al–5Cu в зонах центра (а), середины радиуса (б) и края (в) и соответствующие карты состава

Fig. 3. Microstructure in the cross section of 6Al–5Cu in zones of the center (a), mid–radius (b) and edge (c), and respective elemental compositional maps

Как видно на рис. 1-3 макро и микроструктура полученных образцов заметно отличается. В образце с укладкой 6Cu-5Al (рис.1а и рис 2) наблюдаем перемешивание в области середины радиуса и края образца, в центре процесс перемешивания сводится к образованию в основном трехслойной структуру. В работах [7,20] исследовали металломатричные композиты, полученные из стопок с трехслойной укладкой Cu-Al-Cu (2Cu-1Al) заметное перемешивание наблюдали только на краю образца, при этом деформация для получения образцов была больше. В образце с укладкой 6Al-5Cu (рис.1б и рис.3) перемешивание начинается уже в центре и усиливается к краю образца. В образцах из стопок с трехслойной укладкой Al-Cu-Al (2Al-1Cu) перемешивание начинается с середины радиуса и усиливается на краю образца [7]. Известно, что деформация КВД протекает неоднородно [3]. Для получения хорошего пере-

мешивания, при деформации разнородных материалов, определяющую роль играют условия деформации и способ укладки исходных пластин.

В [10] наиболее однородное перемешивание в центре образца с укладкой Al-Cu-Al получили после деформации кручением на 200 оборотов, а в образце с укладкой Cu-Al-Cu применением аккумулялирующего КВД [20].

В таблице 1 приведены результаты измерения удельной длины межфазных границ в полученных образцах. Сравнение полученных результатов с данными работы [7], где удельную длину межфазных границ измеряли для оценки степени перемешивания при получении металломатричных композитов с трехслойной укладкой, показало, что процесс перемешивания в одиннадцати слойных образцах меди и алюминия протекает более интенсивно.

Таблица 1. Удельной длины межфазных границ деформированных образцов, мкм⁻¹

Table 1. Specific length of interphase boundaries of the samples after НРТ, μm⁻¹

Образец	центр	½ радиуса	край
6Cu-5Al	0.021	0.299	0.415
2Cu-1Al [7]	0.030	0.051	0.085
6Al-5Cu	0.118	0.631	0.214
2Al-1Cu [7]	0.046	0.123	0.355

Результаты ЭДА поперечных сечений исследованных образцов приведены на рис.4 и 5. На изображениях структуры отмечены точки, в которых проведен ЭДА, и фазы, которым соответствует состав в этих точках. В образце 6Cu-5Al были обнаружены точки, состав которых соответствует следующим фазам: медь, твер-

дый раствор меди в алюминии (Al(Cu)), твердый раствор алюминия в меди (Cu(Al)) и точки соответствующие различным ИМС (рис.4). В образце 6Al-5Cu были обнаружены точки состоящие из меди, алюминия, Al(Cu), Cu(Al) и более богатым набором точек соответствующих ИМС (рис.5).

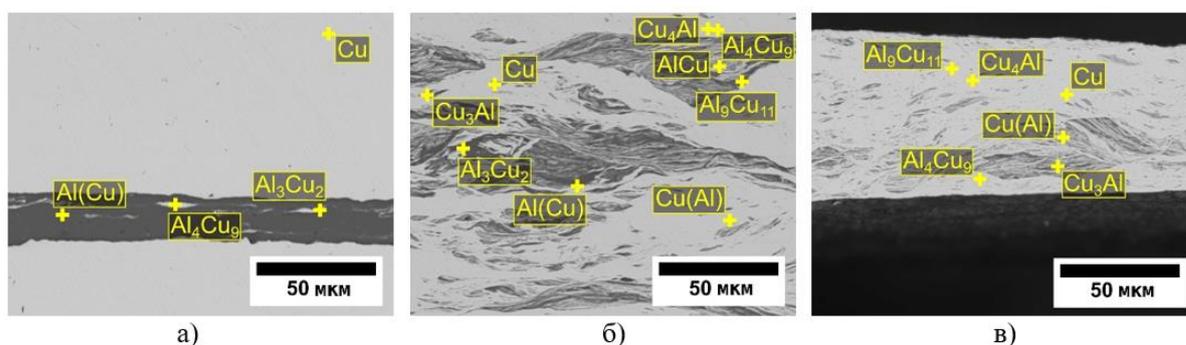


Рис. 4. Точечные спектры распределения меди и алюминия, полученные ЭДА в зонах центра (а), половины радиуса (б) и края (в) образца 6Cu-5Al

Fig 4. Points of EDS spectra of the distribution of copper and aluminum in the zones of center (a), mid-radius (b) and edge (c) in the sample 6Cu-5Al

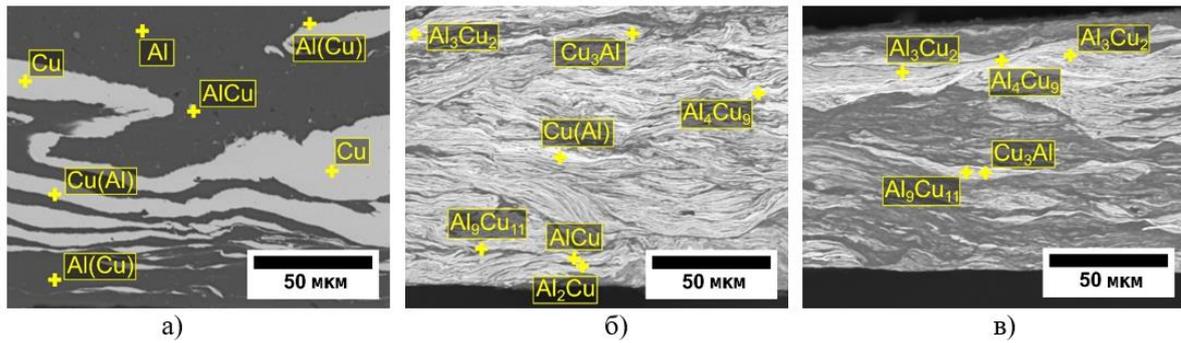


Рис. 5. Точечные спектры распределения меди и алюминия, полученные ЭДА в зонах центра (а), половины радиуса (б) и края (в) образца 6Al-5Cu

Fig 5. Points of EDS spectra of the distribution of copper and aluminum in the zones of center (a), mid-radius (b) and edge (c) in the sample 6Al-5Cu

Рентгенофазовым анализом в обоих образцах обнаружены медь, алюминий, твердые растворы алюминия в меди и интерметаллидные соединения, частично совпадающими с результатами ЭДА.

Количественный фазовый состав изученных образцов заметно различается. В образце 6Cu-5Al наиболее представительными фазами являются медь и твердый раствор алюминия в меди 95.9 %, с небольшим количеством интерметаллидов AlCu, Al₂Cu, Al₄Cu₉ и алюминия. Медь и твердый раствор алюминия в меди (в таблице 2 обозначен как Cu(Al)) имеют различ-

ные параметры решётки. Параметр кристаллической решётки меди равен $a=0.36158(2)$ нм, параметр кристаллической решётки твердого раствора Cu(Al) составляет $a=0.36347(2)$ нм.

В образце 6Al-5Cu преобладают алюминий 66.2 % и медь 26 % с небольшим количеством интерметаллидных соединений и твердого раствора алюминия в меди. Здесь медь и твердый раствор алюминия в меди Cu(Al) также различаются параметром кристаллической решётки. Для меди $a=0.36156(2)$ нм, для твердого раствора Cu(Al) $a=0.36557(2)$ нм.

Таблица 2. Фазовый состав исследованных образцов по данным РФА

Table 2. Phase composition of the samples obtained by XRD

Фазы, %	6Cu-5Al	6Al-5Cu
Al	1.2	66.2
Cu	64.1	26.5
Cu(Al)	31.8	4.7
AlCu	0.8	0.4
Al ₂ Cu	0.5	0.9
Al ₄ Cu ₉	1.6	1.3

Заметим, что формирование твердого раствора алюминия в меди в процессе получения металломатричных композитов методом акку-

мулирующего КВД после отжига наблюдали в [21].

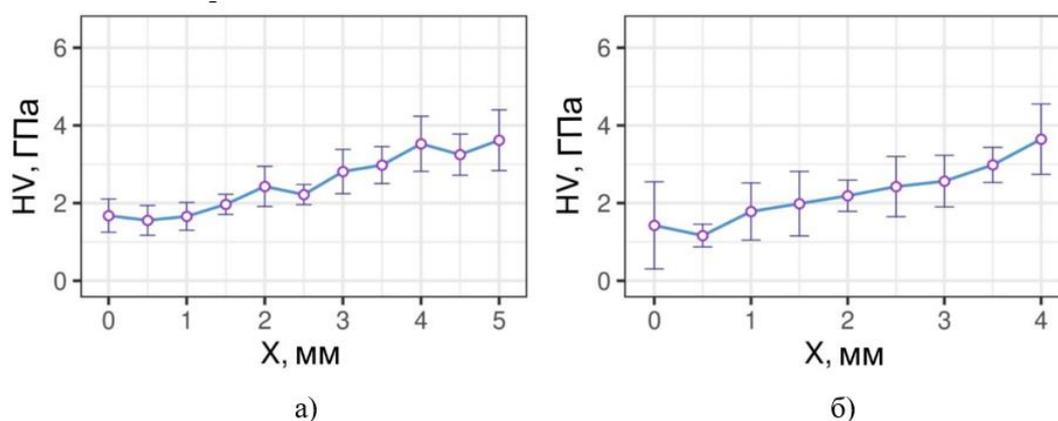


Рис. 6. Распределение микротвердости по радиусу на поперечном сечении образцов 6Cu-5Al (а) и 6Al-5Cu (б)

Fig. 6. Microhardness distribution along the radius in the cross-section of the samples 6Cu-5Al (a) и 6Al-5Cu (b)

Распределение микротвердости по радиусу на поперечном сечении исследованных многослойных образцов после КВД представлена на рис 6. Микротвердость растет от 1.5 ГПа в центре до 3.5 ГПа к краю в обоих образцах. Отметим, что значения микротвердости исходных образцов меди и алюминия после деформации КВД ниже [4], чем у полученных образцов. В [23] трёхслойный образец с укладкой Al-Cu-Al имел значительно меньшую микротвердость даже после деформации КВД на 100 оборотов.

Механические свойства полученных металлматричных композитов тесно связаны со структурой и фазовым составом исследованных образцов. В образце 6Cu-5Al структура менее однородна, в фазовом составе преобладает медь и твердый раствор алюминия в меди. В образце 6Al-5Cu структура значительно более однородна, в фазовом составе преобладает алюминий, медь и твердый раствор алюминия в меди. Суммарная массовая доля интерметаллидов примерно одинаковая в области проведения РФА в обоих образцах. Вероятно, такое сочетание структуры и фазового состава в исследованных образцах привело к подобному поведению микротвердости.

Отметим, что результате деформации многослойных образцов получены достаточно тонкие образцы. Значительная часть материала была выдавлена из-под бойков в процессе КВД в облой. При дальнейшем исследовании деформацию надо проводить в ограниченных условиях (бойки с канавкой) [3] и уменьшить толщину исходных пластин [18].

Выводы

Проведенное исследование показало, что деформацией кручением под давлением 6 ГПа на 5 оборотов 11 слойных стопок алюминия и меди с различным чередованием слоев были получены металлматричные композиты системы Al-Cu. Структура полученных образцов значительно различается: в образце с укладкой 6Al-5Cu алюминий и медь перемешались в большей части образца, включая центральную часть, в то же время как в образце с укладкой 6Cu-5Al центральная часть слабо перемешана и имеет трехслойную структуру.

Фазовый состав полученных образцов также заметно отличается. В образце 6Al-5Cu в процессе КВД наблюдаются алюминий, медь, твердый раствор алюминия в меди, интерметаллидные фазы AlCu, Al₂Cu, Al₄Cu₉. В образце 6Cu-5Al обнаружены 95.9 % меди и твердого раствора алюминия в меди, а также присутствие небольшого количества интерметаллидов AlCu, Al₂Cu, Al₄Cu₉ и алюминия. Рентгенофазовый анализ показал, что в образце 6Cu-5Al вместе с медью присутствует фаза твердого раствора алюминия в меди ($a = 0.36347(2)$ нм). В образце 6Al-5C вместе с медью и алюминием присутствуют интерметаллидные фазы и твердый раствор алюминия в меди $a=0.36557(2)$ нм.

Микротвердость исследованных образцов, измеренная в поперечном сечении, значительно выше микротвердости исходных металлов и практически не зависит от способа укладки. За счет более однородной структуры и фазового

состава микротвердость 11 слойных образцов превосходит микротвердость образцов, полученных при деформации стопок меди и алюминия с трехслойной укладкой

Список литературы

1. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. М.: Химия. 1978. 360 с.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2014. 440 p.
3. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing. // *Fundament. Appl. Prog. Mater. Sci.* 2008. V. 53, P. 893–979.
4. Danilenko V.N., Sergeev S.N., Baimova J.A., Korznikova G.F., Nazarov K.S., Khisamov R.K., Glezer A.M., Mulyukov R.R. An approach for fabrication of Al-Cu composite by high pressure torsion // *Materials Letters*. 2019. V. 236, P. 51-55.
5. Han J. K., Herndon T., Jang J.I., Langdon T.G., Kawasaki M. Synthesis of Hybrid Nanocrystalline Alloys by Mechanical Bonding through High-Pressure Torsion // *Advanced Engineering Materials*. 2020. V. 22, P. 1901289.
6. Oh-Ishi K., Edalati K., Kim H.S., Hono K., Horita, Z. High-pressure torsion for enhanced atomic diffusion and promoting solid-state reactions in the aluminum–copper system // *Acta Materialia*. 2013. V. 61, P. 3482-3489.
7. Korznikova G.F., Mulyukov R.R., Zhilyaev A.P., Danilenko V.N., Khisamov R.K., Nazarov K.S., Sergeev S.N., Khalikova G.R., Kabirov R.R. Al-Cu layered composites fabricated by deformation // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 2053, 030028.
8. Даниленко В.Н., Гальшев С.Н., Мулюков Р.Р. Получение сплава алюминия с ниобием методом механического легирования сдвигом под давлением // *Перспективные материалы*. 2009. № 7, С. 94-97.
9. Ahn B., Zhilyaev A.P., Lee H.-J., Kawasaki M., Langdon T.G. Rapid synthesis of an extra hard metal matrix nanocomposite at ambient temperature // *Materials Science and Engineering A*. 2015. V. 635, P. 109-117.
10. Bazarnik P., Bartkowska A., Romelczyk-Baishya B., Adamczyk-Cieslak B., Dai J., Huang Yi., Lewandowska M., Langdon T.G. Superior strength of tri-layered Al-Cu-Al nano-composites processed by high-pressure torsion // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 846, 156380.
11. Sundeev R.V., Shalimova A. V., Rogachev S.O., Chernogorova O.P., Glezer A.M., Ovcharov A.V., Karateev I.A. Role of structural changes in the composite consolidation from dissimilar layers upon high-pressure torsion // *Materials Letters*. 2023. V.331, P. 133513.
12. Kawasaki M., Langdon T.G. Fabrication of High Strength Hybrid Materials through the Application of High-Pressure Torsion // *Acta Physica Polonica Series a*. 2018. V. 134, P. 615-623.
13. Bartkowska A., Bazarni, P., Huang Y., Lewandowska M., Langdon T. G. Using high-pressure torsion to fabricate an Al – Ti hybrid system with exceptional mechanical properties // *Materials Science and Engineering A*. 2021. V. 799, 140114.
14. Bazarnik P., Bartkowska A., Huang Y., Szlązak K., Adamczyk-Cieślak B., Sort, J., Lewandowska M., Langdon, T.G. Fabrication of hybrid nanocrystalline Al–Ti alloys by mechanical bonding through high-pressure torsion// *Materials Science and Engineering A*. 2022. V. 833, P. 142549.
15. Ibrahim N., Peterlechner M., Friederike Emeis F., Wegner M., Divinski S.V., Wilde G. Mechanical alloying via high-pressure torsion of the immiscible Cu₅₀Ta₅₀ system // *Materials Science and Engineering A*. 2017. V. 685, P. 19-30.
16. Chen C., Yu J., Lu J., Zhang J., Su X., Qian C.-H., Liu M. Phase Transformation in Al/Zn Multilayers during Mechanical Alloying // *Acta Metallurgica Sinica*. 2023. V. 36, P. 1709-1718.
17. Pouryazdan M., Kaus B.J.P., Rack A., Ershov A., Hahn H. Mixing instabilities during shearing of metals. // *Nature communications*. 2017. V. 8, 1611.
18. Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Yu., Mazilkin A., Straumal A., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // *Materials Letters*, 2018. V. 222, P.172-175.
19. Gunderov D.V., Churakova A.A., Astanin V.V., Asfandiyarov R N., Hahn H. & Valiev R.Z. Accumulative HPT of Zr-based bulk metallic glasses // *Materials Letters*. 2020. V. 261, 127000
20. Danilenko V.N., Kiekkuzhina L.U., Parkhimovich N.Y., Khafizova E.D., Gunderov D.V. Cu-Al metal matrix composite fabricated by accumulative HPT // *Materials Letters*. 2021. V. 300, 130240.

21. Danilenko V.N., Kiekkuzhina L.U., Parkhimovich N.Y., Gunderov D.V. Effect of annealing on the structure and phase composition of Cu-Al composite produced by conventional and accumulative HPT // Letters on Materials. 2022. V 12 (4), P. 276-281.

22. Danilenko V.N., Parkhimovich N.Y., Kiekkuzhina L.U., Gunderov D.V. The effect of route and post-deformation annealing on the mechanical properties and structure of the Cu-Al composite produced by accumulative HPT // Letters on Materials. 2023. V 13 (4s), P. 444-449.

23. 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. 2023. V. 35, P. 1433-1444.

Информация об авторах

В. Н. Даниленко – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Л.У. Киеккужина – аспирант и стажер-исследователь Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Ю.А. Лебедев кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН

В.Д. Ситдиков - доктор физико-математических наук, старший эксперт ООО «РН-БашНИИНефть»

References

1. Tretyakov, Yu. D. (1978) Solid phase reactions. M. Chemistry. P. 360. (In Russ.)
2. Valiev, R. Z., Zhilyaev, A. P. & Langdon, T. G. (2014). Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. P. 440.
3. Zhilyaev, A. P., & Langdon, T. G. (2008). Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. Progress in Materials science, 53(6), 893-979.
4. Danilenko, V. N., Sergeev, S. N., Baimova, J. A., Korznikova, G. F., Nazarov, K. S., Khisam-

ov, R. K., Gleizer, A. M. & Mulyukov, R. R. (2019). An approach for fabrication of Al-Cu composite by high pressure torsion. Materials Letters, 236, 51-55.

5. Han, J. K., Herndon, T., Jang, J. I., Langdon, T. G., & Kawasaki, M. (2020). Synthesis of hybrid nanocrystalline alloys by mechanical bonding through high-pressure torsion. Advanced Engineering Materials, 22(4), 1901289.

6. Oh-Ishi, K., Edalati, K., Kim, H. S., Hono, K., & Horita, Z. (2013). High-pressure torsion for enhanced atomic diffusion and promoting solid-state reactions in the aluminum-copper system. Acta Materialia, 61(9), 3482-3489.

7. Korznikova, G. F., Mulyukov, R. R., Zhilyaev, A. M., Danilenko, V. N., Khisamov, R. K., Nazarov, K. S., Sergeev, S.N., Khalikova, G.R., & Kabirov, R. R. (2018,). Al-Cu layered composites fabricated by deformation. AIP Conference Proceedings, 2053, 030028.

8. Danilenko, V. N., Galishev, S. N. & Mulyukov, R. R. (2009) Preparation of an aluminum alloy with niobium by mechanical alloying by shear under pressure. Perspective Materials, 7, 94 (In Russ)

9 Ahn, B., Zhilyaev, A. P., Lee, H. J., Kawasaki, M., & Langdon, T. G. (2015). Rapid synthesis of an extra hard metal matrix nanocomposite at ambient temperature. Materials Science and Engineering: A, 635, 109-117.

10 Bazarnik, P., Bartkowska, A., Romelczyk-Baishya, B., Adamczyk-Cieślak, B., Dai, J., Huang, Y., Lewandowska, M. & Langdon, T. G. (2020). Superior strength of tri-layered Al-Cu-Al nano-composites processed by high-pressure torsion. Journal of Alloys and Compounds, 846, 156380.

11. Sundeev, R. V., Shalimova, A. V., Rogachev, S. O., Chernogorova, O. P., Glezer, A. M., Ovcharov, A. V., & Karateev, I. A. (2023). Role of structural changes in the composite consolidation from dissimilar layers upon high-pressure torsion. Materials Letters, 331, 133513.

12. Kawaski, M., & Langdon, T. G. (2018). Fabrication of high strength hybrid materials through the application of high-pressure torsion. Acta Physica Polonica A, 134(3), 615-622.

13. Bartkowska, A., Bazarnik, P., Huang, Y., Lewandowska, M., & Langdon, T. G. (2021). Using high-pressure torsion to fabricate an Al-Ti hybrid system with exceptional mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, 799, 140114.

14. Bazarnik, P., Bartkowska, A., Huang, Y., Szlązak, K., Adamczyk-Cieślak, B., Sort, J., Levandovska, M. & Langdon, T. G. (2022). Fabrication of hybrid nanocrystalline Al–Ti alloys by mechanical bonding through high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*, 833, 142549.
15. Ibrahim, N., Peterlechner, M., Friederike, Emeis, F., Wegner, M., Divinski, S. V., Wilde, G. (2017). Mechanical alloying via high-pressure torsion of the immiscible Cu50Ta50 system // *Materials Science & Engineering A*. V. 685, P. 19-30.
16. Chen, C., Yu, J., Lu, J., Zhang, J., Su, X., Qian, C.-H., & Liu, M. (2023). Phase transformation in Al/Zn multilayers during mechanical alloying. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 36, 1709-1718.
17. Pouryazdan, M., Kaus, B. J. P., Rack, A., Ershov, A., & Hahn, H. (2017). Mixing instabilities during shearing of metals. *Nature communications*, 8(1), 1611.
18. Kulagin, R., Beygelzimer, Y., Ivanisenko, Yu., Mazilkin, A., Straumal A. & Hahn H. (2018) Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // *Materials Letters*. V. 222. P.172-175.
19. Gunderov, D. V., Churakova, A. A., Astanin, V. V., Asfandiyarov, R. N., Hahn, H., & Valiev, R. Z. (2020). Accumulative HPT of Zr-based bulk metallic glasses. *Materials Letters*, 261, 127000.
20. Danilenko, V. N., Kiekkuzhina, L. U., Parkhimovich, N. Y., Khafizova, E. D., & Gunderov, D. V. (2021). Cu-Al metal matrix composite fabricated by accumulative HPT. *Materials Letters*, 300, 130240.
21. Danilenko, V. N., Kiekkuzhina, L. U., Parkhimovich, N. Y., & Gunderov, D. V. (2022). Effect of annealing on the structure and phase composition of Cu-Al composite produced by conventional and accumulative HPT. *Letters on Materials*, 12(4), 276-281.
22. Danilenko, V. N., Parkhimovich, N.Y., Kiekkuzhina, L.U., Gunderov, D.V.. (2023) The effect of route and post-deformation annealing on the mechanical properties and structure of the Cu-Al composite produced by accumulative HPT *Letters on Materials*, 13 (4s), 444-449.
23. Khisamov, R. K., 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. (2023). 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.

Information about the authors

V.N. Danilenko – Candidate of Physical-Mathematic Sciences, Senior Researcher, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences.

L.U. Kiekkuzhina - Post-Graduate Student Research Intern, Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences.

Yu.A. Lebedev - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Molecular and Crystal Physics UFRC RAS

V.D. Sitdikov Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), senior expert, LLC "RN-BashNIPIneft"

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 07 Oct. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.