

**Received:** 27.09.2022

**Revised:** 24.11.2022













**Accepted:** 23.12.2022

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2022.6.035-045

## THE EFFECT OF ALUMINUM CONCENTRATION ON THE STRUCTURE EVOLUTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu/Al COMPOSITES PRODUCED BY ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING

A. O. Panfilov<sup>a),\*</sup>, A. P. Zykova<sup>b)</sup>, A. V. Chumaevskii<sup>c)</sup>, V. A. Beloborodov<sup>d)</sup>,  
S. Yu. Nikonov<sup>e)</sup>, and E. A. Kolubaev<sup>f)</sup>

*Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;  
b)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;  
c)  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;  
d)  <https://orcid.org/0000-0001-9431-0226>  vabel@ispms.tsc.ru;  
e)  <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>  sergrff@ngs.ru;  
f)  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.tsc.ru

\*Corresponding author. E-mail: alexpl@ispms.ru

Address for correspondence: pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk, 634055, Russia  
Tel.: +7 (900) 104 9453

Electron-beam additive manufacturing with a simultaneous feed of two wires is used to produce Cu/Al composites with different contents of Al-12Si aluminum alloy. The obtained specimens are examined by optical microscopy and X-ray diffraction analysis and tested for uniaxial static tension. The introduction of 25 vol % Al-12Si is found to form a fairly homogeneous structure characterized by Cu dendrites and a small volume fraction of Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> and Cu<sub>4</sub>Al intermetallic compounds on the dendritic cell boundaries. The increase of the volume fraction of Al-12Si in the copper alloy to 33 vol % is accompanied by the formation of Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, Cu<sub>4</sub>Al, and Cu<sub>3</sub>Al intermetallics and an increase in their volume fraction. In the composite with 33 vol % Al-12Si, the Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> phase becomes the main one, thus causing brittle fracture of the specimens without plastic deformation. It is shown that, with an increase in the volume fraction of Al-12Si to 30 %, ultimate strength increases significantly in the copper alloy (up to 695 MPa) and relative elongation decreases (down to 4 %) due to the increasing volume fraction of the brittle Cu<sub>x</sub>Al<sub>y</sub> intermetallic phases. The results of hardness measurements testify that the increase of Al-12Si content in the specimens from 25 to 33 vol % increases their microhardness significantly, namely from 1.38 to 4.35 GPa.

**Keywords:** electron-beam additive manufacturing, Cu/Al composite, intermetallic, microstructure, mechanical properties.

### Acknowledgment

*The work was supported by the grant from the President of the Russian Federation for the state support of leading scientific schools, No. NSh-1174.2022.4. It was performed under the state assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0012.*

## References

1. Fujii H.T., Endo H., Sato Y.S., Kokawa H. Interfacial microstructure evolution and weld formation during ultrasonic welding of Al alloy to Cu. *Materials Characterization*, 2018, vol. 139, pp. 233–240. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.03.010.
2. Shin Hyung-Seop, De Leon Michael. Mechanical performance and electrical resistance of ultrasonic welded multiple Cu-Al layers. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 241, pp. 141–153. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.004.
3. Lapovok R., Ng H.P., Tomus D., Estrin Y. Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*, 2012, vol. 66, pp. 1081–1084. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.004.
4. Powell C., Stillman H. Corrosion behaviour of copper alloys used in marine aquaculture. *International Copper Association*, 2009, pp. 1–3.
5. Callcut V.A. Aluminium bronzes for industrial use. *Metals and materials*, 1989, vol. 5, No. 3, pp. 128–132.
6. Nesma T.A., Simonelli M., Parry L., Ashcroft I., Tuck C., Hague R. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. *Progress in Materials Science*, 2019, vol. 106, pp. 100578. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
7. Gong V., Meng Y., Zhang S., Zhang Y., Zeng X., Gao M. Laser-arc hybrid additive manufacturing of stainless steel with beam oscillation. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 33, pp. 101180. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101180.
8. Cai X., Dong B., Yin X., Lin S., Fan C., Yang C. Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: Processing, microstructures, and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, pp.101344. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101344.
9. Pu Ze, Dong Du, Wang Kaiming, Liu Guan, Zhang Dongqi, Zhang Haoyu, Xi Rui, Wang Xiebin, Chang Baohua. Study on the NiTi shape memory alloys in-situ synthesized by dual-wire-feed electron beam additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 26, pp. 102886. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102886.
10. Astafurov S., Astafurova E., Reunova K., Melnikov E., Panchenko V., Moskvina V., Maier G., Rubtsov V., Kolubaev E. Electron-beam additive manufacturing of high-nitrogen steel: Microstructure and tensile properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 826, pp. 141951. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141951.
11. Chumaevskii A., Kalashnikova T., Gusarova A., Knjazhev E., Kalashnikov K., Panfilov A. The Structure Organization and Defect Formation of Cu-Al System Polymetallic Materials Produced by the Electron-Beam Additive Technology. In: *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, 2020, pp. 1294–1298.
12. Chumaevskii A.V., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Zykova A.P., Gusarova A.V., Kalashnikov K.N., Vorontsov A.V., Savchenko N.L., Nikonov S.Y., Cheremnov A.M., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Production of Gradient Intermetallic Layers Based on Aluminum Alloy and Copper by Electron-beam Additive Technology. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2021, pp. 19–31. DOI: 10.17804/2410-9908.2021.6.019-031. Available at: [https://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6\\_342.html](https://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6_342.html)

Подана в журнал: 27.09.2022













УДК 539.25:621.791.14:620.186.12: 620.17

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.035-045

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛЮМИНИЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ Cu/Al, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

А. О. Панфилов<sup>а)</sup>, \* , А. П. Зыкова<sup>б)</sup>, А. В. Чумаевский<sup>в)</sup>, В. А. Белобородов<sup>г)</sup>,  
С. Ю. Никонов<sup>д)</sup>, Е. А. Колубаев<sup>е)</sup>

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,  
пр. Академический 2/4, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

- а)  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;  
б)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;  
в)  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;  
г)  <https://orcid.org/0000-0001-9431-0226>  vabel@ispms.tsc.ru;  
д)  <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>  sergrff@ngs.ru;  
е)  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.tsc.ru

\*Ответственный автор. Электронная почта: alexpl@ispms.ru

Адрес для переписки: пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация  
Тел.: +7-900-104-94-53

Методом электронно-лучевого аддитивного производства с одновременной подачей двух проволок были получены композиты Cu/Al с различным содержанием алюминиевого сплава АК12. Полученные заготовки исследовались методами оптической микроскопии, методом рентгеноструктурного анализа, проведены испытания на одноосное статическое растяжение. Установлено, что введение 25 об. % АК12 приводит к формированию относительно однородной структуры характеризующейся дендритами Cu и незначительной объемной долей интерметаллидов Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> и Cu<sub>4</sub>Al по границам дендритных ячеек. С увеличением объемной доли АК12 до 33 об. % в медном сплаве происходит увеличение объемной доли и формирование интерметаллидов Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>, Cu<sub>4</sub>Al, и Cu<sub>3</sub>Al. В композите с содержанием 33 об. % АК12 фаза Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> становится основной, что приводит к хрупкому разрушению образцов без пластической деформации. Показано, что с увеличением объемной доли АК12 до 30 % в медном сплаве происходит значительное повышение значений предела прочности (до 695 МПа) и снижение значений относительного удлинения (до 4 %) за счет увеличения объемной доли хрупких интерметаллидных фаз Cu<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>. Результаты измерения микротвердости композитов показали, что увеличение содержания АК12 с 25 об. % до 33 об. % приводит к значительному росту микротвердости от 1,38 до 4,35 ГПа.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое аддитивное производство, композит Cu/Al, интерметаллиды, микроструктура, механические свойства.

### 1. Введение

Растущий спрос на материалы со свойствами, недостижимыми при использовании отдельных обычных сплавов, побуждает исследователей разрабатывать и изучать возможности при получении так называемых «гибридных материалов». В частности, полиметаллические материалы могут обеспечивать интересные комбинации структурных и функциональных свойств. Например, медно-алюминиевые сплавы обладают хорошей коррозионной стойкостью и отличной электропроводностью по сравнению с медью [1–3]. При этом медные спла-

вы применяются в легкой и тяжелой промышленности для производства деталей триботехнического назначения, так как обладают хорошей устойчивостью к воздействию агрессивных сред [4, 5]. Производство медно-алюминиевых сплавов традиционными методами не отличается гибкостью и экономичностью. Существует высокий спрос на оснастку с индивидуальной сложной геометрией, которая должна быть изготовлена своевременно и по низкой цене, без ущерба для точности размеров, механических свойств и трибологических характеристик. Аддитивное производство является прорывной технологией, позволяющей создавать сложные детали послойно, обладает многими преимуществами по сравнению с традиционными технологиями производства, включая возможность изготовления сложных деталей по запросу, более высокую гибкость конструкции, более короткое время выполнения заказов и меньший расход материалов. Селективное лазерное плавление, электронно-лучевое плавление или аддитивное производство проволоки и дуги являются наиболее перспективными высокотехнологичными промышленными методами быстрого прототипирования сложных по форме и неоднородных по составу деталей [6–10]. Электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) имеет ряд преимуществ перед другими аддитивными методами 3D-печати металлом: высокий вакуум в рабочей камере защищает металлические детали от негативного воздействия атмосферы и процесс не требует использования защитного газа; высокая скорость наплавки и возможность изготовления крупных деталей, постобработки поверхности или объемной термообработки заготовок.

Ранее авторами был получен функционально-градиентный материал Cu/Al методом электронно-лучевого аддитивного производства с одновременной подачей двух проволок [11, 12]. Печать осуществляли медной (сплав М1) и алюминиевой проволоками (АМг5) с плавно изменяющейся скоростью подачи от 100 % меди до 100 % алюминиевого сплава. Исследования показали, что в условиях двухпроволочной градиентной подачи в ванну расплава происходит образование неоднородностей и расслоений в зоне структурного градиента [11, 12]. Целью настоящей работы – получение бездефектного композита Cu/Al методом ЭЛАП с различным содержанием алюминиевого сплава АК12 для предотвращения образования структурных неоднородностей и расслоений в получаемых изделиях и для обеспечения повышенных рабочих характеристик геометрически сложных деталей. Выбор АК12 обусловлен наличием в нем кремния, который повышает жидкотекучесть при литье, а также предотвращает образование дефектов в процесс кристаллизации, что может положительно влиять на получение изделия методом ЭЛАП. Алюминиевый сплав АМг5 в свою очередь содержит магний, который склонен к выгоранию в процессе ЭЛАП, что при водит к образованию дефектов [11].

## 2. Материалы и методы

Получение композитов Cu/Al с различным содержанием алюминия осуществлялось по технологии ЭЛАП по представленной схеме (рис. 1). В качестве исходных материалов использовались проволоки меди М1 и алюминиево-кремниевый сплав АК12 диаметрами 1,2 мм. Печать заготовок в виде стенок осуществлялась одновременной подачей проволок меди и алюминиевого сплава в фокус электронного пучка. Напряжение электронного пучка в процессе печати было постоянным и составляло 30 кВ. Для формирования бездефектных композитов Cu/Al значения тока изменяли от 74 мА до 27 мА по мере выращивания материалов. Одновременное плавление проволок приводило к их взаимному перемешиванию и последующей кристаллизации в затвердевший слой. Таким образом, наплавляя слои проволок, формировали заготовки в виде стенки. Получение готового изделия с заданным содержанием алюминия достигалось во время наплавки автоматическим регулированием соответствующего соотношения скоростей подачи проволок. В результате были получены композиты на основе меди с содержанием 25, 27, 30 и 33 об. % АК12.

Образцы для исследования вырезались на электроискровом станке по заданной схеме (рис. 1 б). Поверхность образцов для макро- и микроструктурных исследований готовили на наждачной бумаге с разным размером абразивных элементов и последующей полировкой на алмазной пасте. Подготовленные поверхности образцов подвергали химическому травлению в реактиве 30 мл HCl + 5 г FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O + 60 мл H<sub>2</sub>O.

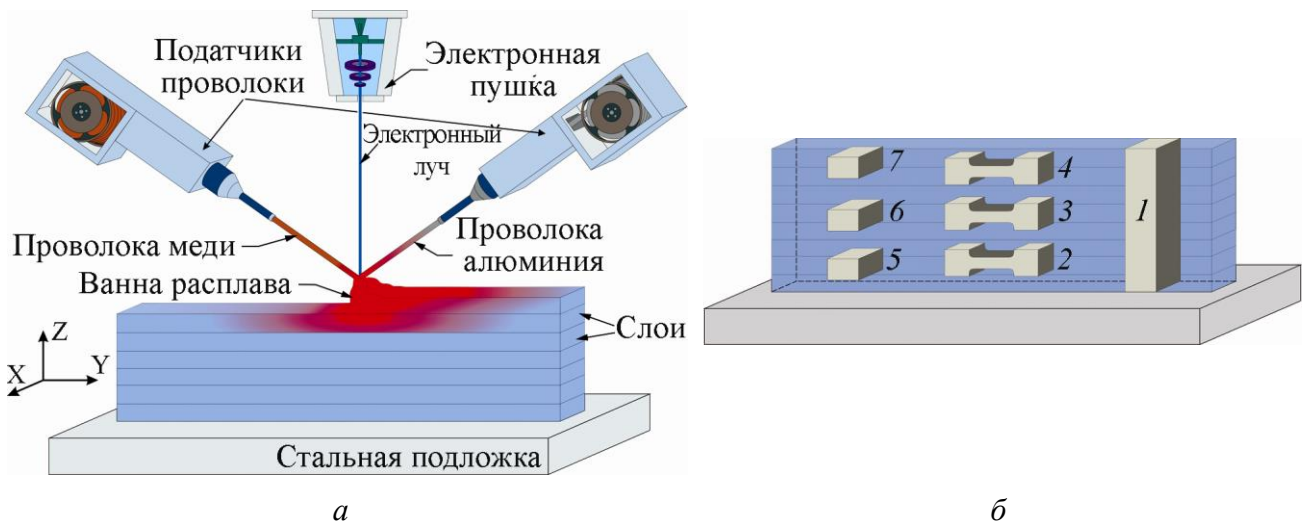


Рис. 1. Схема получения композитов Cu/Al методом ЭЛАП (а) и схема вырезки образцов (б): 1 – поперечное сечение стенки для исследований методом ОМ; 2–4 – образцы для испытаний на растяжение в продольном сечении относительно направления печати; 5–7 – образцы для исследования фазового состава

Макро- и микроструктуру исследовали методом оптической микроскопии на металлографических микроскопах Altamі MET 1С и Olympus LEXT 4100. Измерение микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 по всей высоте стенки. Нагрузка при индентировании составляла 100 г, время выдержки 10 с, шаг индентирования 1 мм. Механические испытания на статическое растяжение осуществлялись на испытательной машине УТС-110М-100-1У. Образцы для испытаний на растяжение имели форму «dog bone» с длиной рабочей части 12, толщиной 2,5 и шириной 2,5 мм, их вырезали в горизонтальном направлении из нижней, средней и верхней частей (рис. 1, образцы 2–4) по 2 образца на нижнюю, среднюю и верхнюю части. Фазовый состав исследовали методом рентгеноструктурного анализа, согласно схеме образцов 5–7 (рис. 2), на установке ДРОН-7 (излучение  $Co_{K\alpha}$ ).

### 3. Результаты с обсуждение

На рис. 2 представлены макро- и микроструктуры композитов на основе меди с различным содержанием АК12. Переходная зона вблизи подложки всех композитов характеризуется наличием стальных частиц и интерметаллидов Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub> в медной матрице (рис. 2 г, з, м, р). В композите Cu/Al с содержанием 25 об. % АК12 наблюдаются разнонаправленные дендриты Cu. По границам дендритов Cu располагаются интерметаллиды системы Cu-Al (рис. 2 б, в). По данным рентгенофазового анализа для композита с содержанием 25 об. % АК12 основной фазой является твердый раствор  $\alpha$ -Cu с малой объемной долей фаз Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> и Cu<sub>4</sub>Al (рис. 3). При этом структура композита относительно однородна.

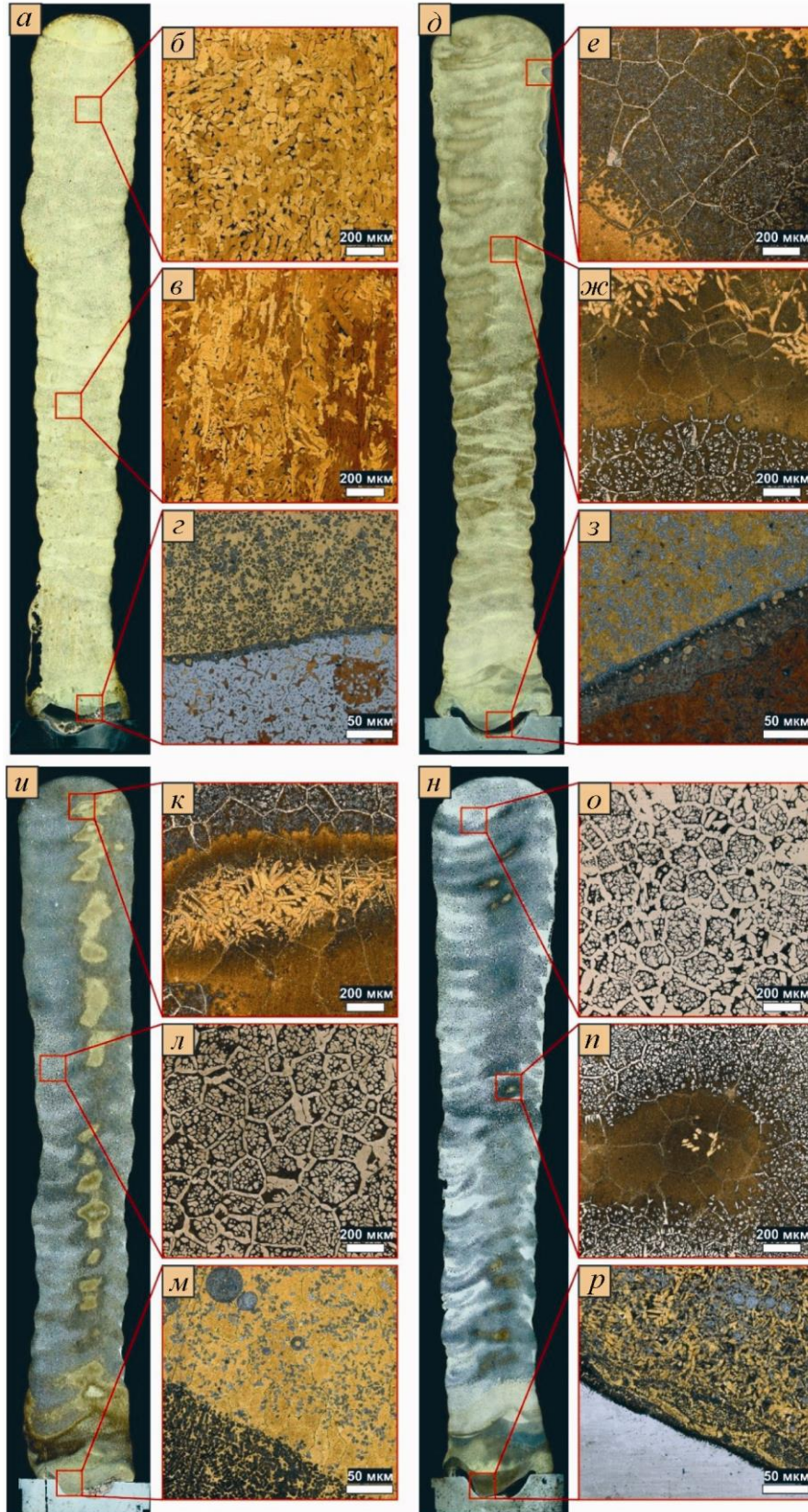


Рис. 2. Макро- и микроструктура композитов Cu/Al с 25 об. % Al (а-с); 27 об. % Al (д-з); 30 об. % Al (u-м) и 33 об. % Al (h-р)

Увеличение концентрации АК12 в медном сплаве приводит к структурным неоднородностям (рис. 2 а, д, и, н). При увеличении концентрации алюминиевого сплава от 27 до 33 об. % происходит формирование слоев с неоднородной структурой (рис. 2 ж, л, п). Структурная неоднородность заключается в наличии областей чистой меди, твердого раствора, интерметаллидов и их смешанной структурой. При этом сильно изменяется зеренная структура композитов, переходящая из дендритов Cu в преимущественно равноосные зерна, в теле и по границам которых наблюдаются интерметаллиды.

Только в отдельных областях наблюдаются небольшие скопления дендритов Cu (рис. 2 ж, л, п). С увеличением объемной доли алюминиевого сплава до 27 и 30 об. % помимо фаз  $\alpha$ -Cu,  $Cu_9Al_4$  и  $Cu_4Al$  наблюдается формирование фазы  $Cu_3Al$  (рис. 3). Увеличивается также объемная доля фаз  $Cu_4Al$  и  $Cu_3Al$  по сравнению с композитами, содержащими 25, 27 и 30 об. % АК12. В композите с содержанием 33 об. % АК12 значительно изменяется соотношение интенсивностей рефлексов, в котором фаза  $Cu_9Al_4$  становится основной. Увеличение объемной доли фазы  $Cu_9Al_4$  хорошо визуализируется на рис. 2 ж, к, о, где фаза  $Cu_9Al_4$  локализуется по границам равноосных зерен и внутри них в виде отдельных частиц.

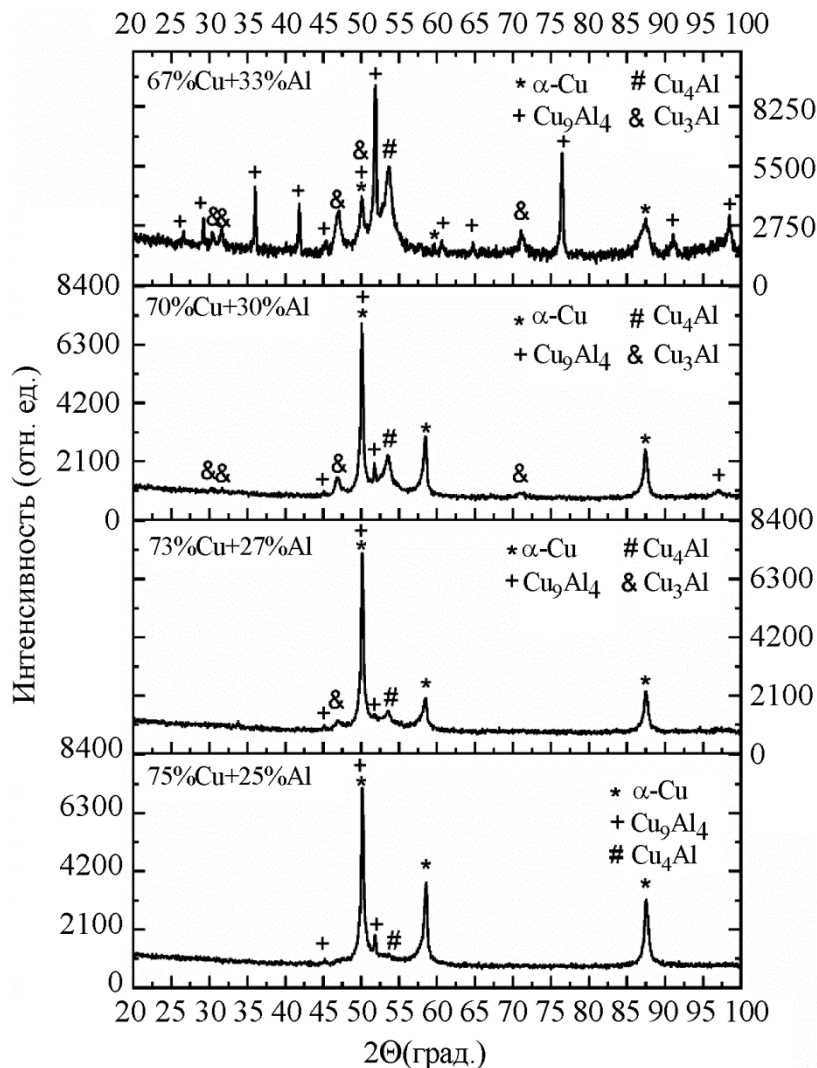


Рис. 3. Рентгенограммы композитов Cu/Al с различным содержанием АК12

Испытания композитов с различным содержанием алюминиевого сплава на статическое одноосное растяжение показали, что для всех образцов, вырезанных из нижней, средней

и верхней частей стенки (рис. 1 б), наблюдается линейный участок упругости. Образцы с содержанием 25 об. % АК12 имеют наибольшие значения относительного удлинения ( $26\text{--}34 \pm 1\%$ ) по сравнению с другими композитами (рис. 4). При этом значения предела прочности для нижней, средней и верхней зоны составляют  $461 \pm 23,5$ ,  $452 \pm 22,6$  и  $467 \pm 23,4$  МПа соответственно.

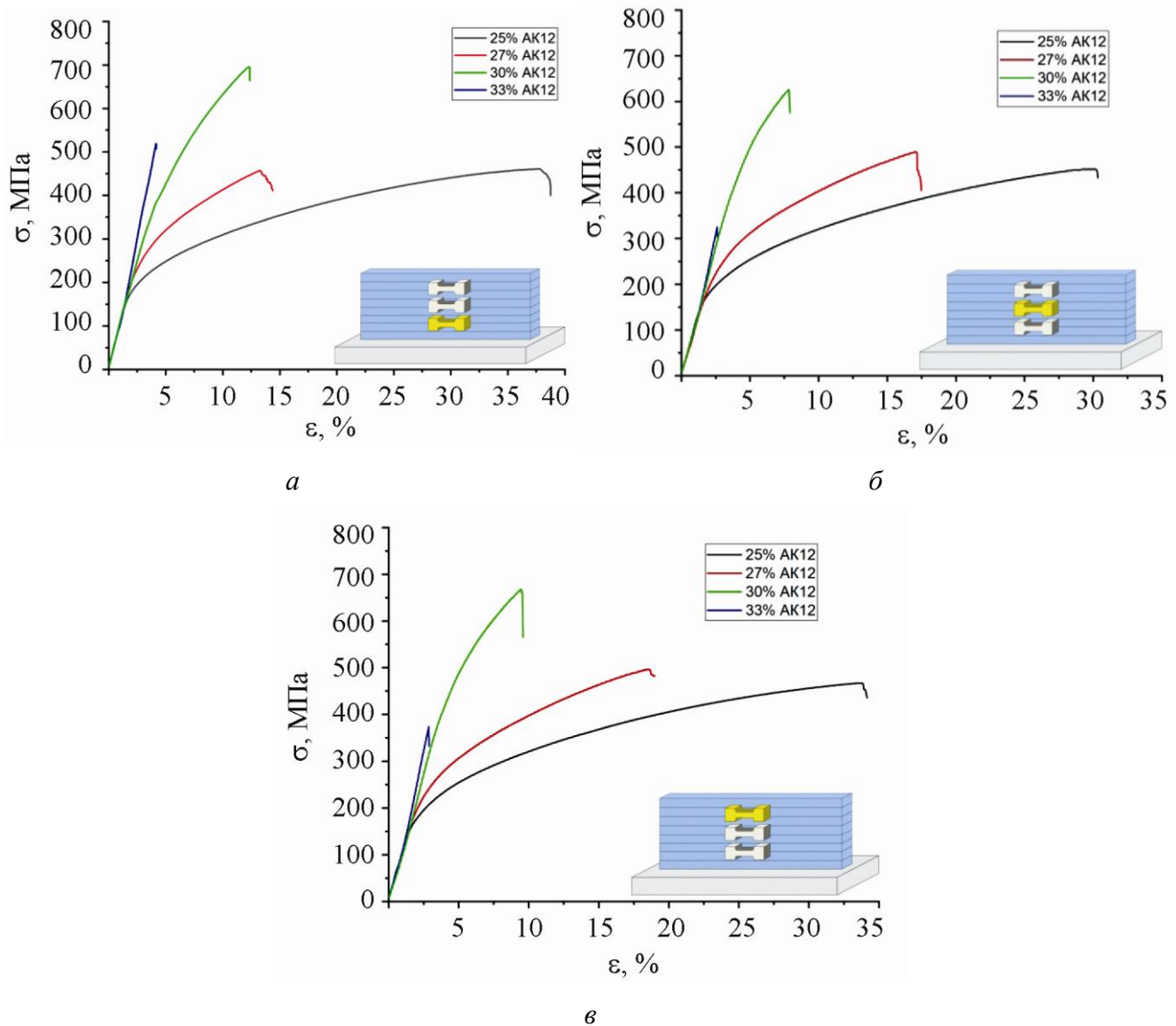


Рис. 4. Кривые *напряжение–деформация*, полученные при испытаниях на статическое растяжение композитов Cu/Al, для образцов, вырезанных: *а* – в нижней части стенки; *б* – в средней части стенки; *в* – в верхней части стенки

Особенность пластического течения композита с содержанием 27 об. % АК12 заключается в увеличении значений предела прочности по всей высоте стенки до  $\sim 480 \pm 24$  МПа (рис. 4). При этом наблюдается незначительная анизотропия по высоте стенки в значениях относительного удлинения, которые составляют для нижней средней и верхней части  $11 \pm 0,6$ ,  $13 \pm 0,7$  и  $15 \pm 1\%$  соответственно.

Для композитов с содержанием 30 об. % АК12 наблюдается резкий рост значений предела прочности до 695 МПа вне зависимости от части, из которой были вырезаны образ-



цы (рис. 4). Значения относительного удлинения при этом резко снижаются до значений  $6 \pm 0,5$ ,  $5 \pm 0,3$ ,  $4 \pm 0,3$  %. Увеличение концентрации алюминиевого сплава до 33 об. % приводит к хрупкому разрушению образцов без пластической деформации (рис. 4). Таким образом, с увеличением объемной доли АК12 до 30 % в медном сплаве происходит значительное повышение значений предела прочности и снижение значений относительного удлинения за счет увеличения объемной доли хрупких интерметаллидных фаз  $Cu_xAl_y$ .

На рис. 5 представлены профили микротвердости образцов Cu/Al с различным содержанием алюминиевого сплава. Для композита с содержанием 25 об. % АК12 наблюдается относительно равномерное распределение значений микротвердости, что связано с формированием относительно однородной структуры, состоящей из дендритов Cu, по границам которых располагается незначительное количество интерметаллидных фаз  $Cu_9Al_4$  и  $Cu_4Al$  (рис. 5). Увеличение концентрации алюминиевого сплава от 27 до 33 об. % в меди приводит к значительному повышению значений микротвердости более чем в 3 раза. При этом профили микротвердости имеют значительный разброс значений, что связано с формированием неоднородной структуры и попаданием индентора в области твердого раствора и интерметаллидных фаз  $Cu_xAl_y$ .

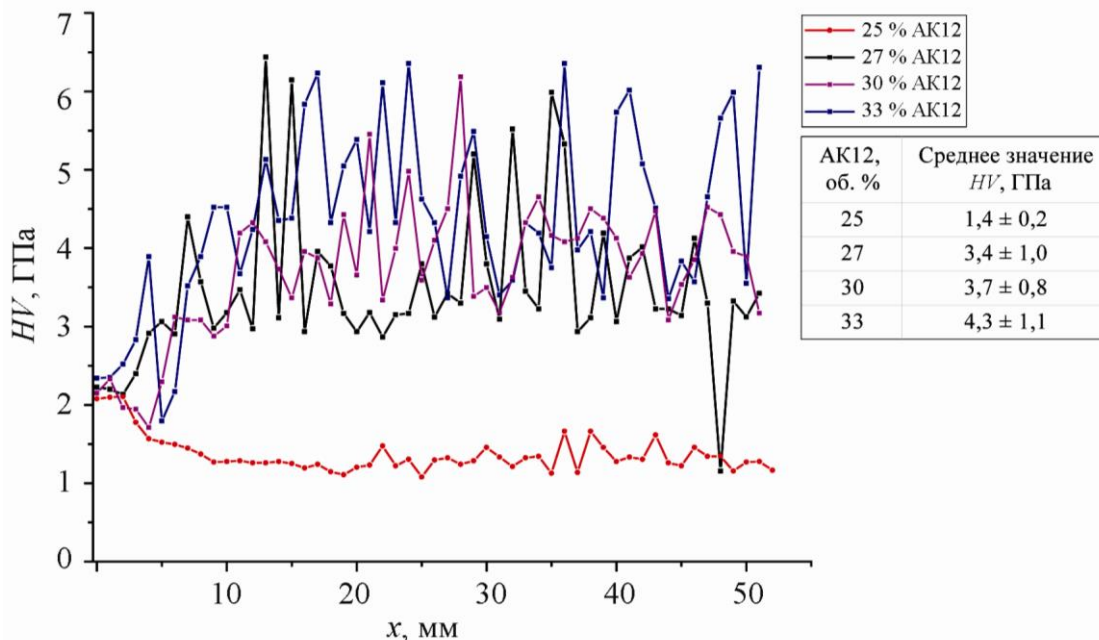


Рис. 5. Профили микротвердости образцов Cu/Al с различным содержанием АК12

Сравнивая результаты настоящей работы, в которой композиты получались одновременной печатью проволок меди М1 и алюминиевого сплава АК12, с предыдущими исследованиями [11, 12], в которых градиентные материалы получались путем печати проволоками меди М1 и алюминиевого сплава АМг5 с плавно изменяющейся скоростью подачи от 100 % меди до 100 % алюминиевого сплава, можно отметить несколько важных фактов. Реализация схемы одновременной печати филаментами М1 и АК12, представленной в настоящей работе, приводит к формированию бездефектных изделий и более однородному структурно-фазовому состоянию по всей высоте изделия. Это способствует повышению предела прочности в 2 раза по сравнению с пределом прочности образцов в работе [12]. Значения микротвердости композитов, полученных в настоящей работе, имеют меньшие средние значения (6,5 ГПа) по сравнению с материалами, полученными в работе [12], для которых среднее значение микротвердости составляет 9 ГПа. При этом для композитов

профиль микротвердости имеет менее скачкообразное распределение, чем для материалов с резким градиентом.

#### 4. Заключение

Методом электронно-лучевой аддитивной технологии были получены композиты Cu/Al с различной концентрацией алюминиевого сплава АК12. Установлено, что введение 25 об. % АК12 приводит к формированию относительно однородной структуры, характеризующейся дендритами Cu и незначительной объемной долей интерметаллидов  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  и  $\text{Cu}_4\text{Al}$  по границам дендритных ячеек. С увеличением объемной доли АК12 до 33 об. % в медном сплаве происходит увеличение объемной доли и формирование интерметаллидов  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ,  $\text{Cu}_4\text{Al}$ , и  $\text{Cu}_3\text{Al}$ . Результаты испытаний образцов на статическое растяжение показали, что увеличение концентрации АК12 до 30 об. % приводит к повышению значений предела прочности и понижению значений относительного удлинения, что обусловлено образованием хрупких интерметаллидных фаз  $\text{Cu}_x\text{Al}_y$ . В образце с 33 об. % АК12 происходит хрупкое разрушение без пластической деформации. Значение микротвердости полученных композитов возрастает с увеличением содержания алюминия: с  $1,38 \pm 0,24$  ГПа для 25 об. % АК12 до  $4,35 \pm 1,13$  ГПа для 33 об. % АК12. Таким образом, исследования показали возможность получения методом ЭЛАП бездефектных композитов Cu/Al с различным содержанием АК12 с высокими прочностными свойствами.

#### Благодарность

*Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-1174.2022.4 и государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0012.*

#### Литература

1. Interfacial microstructure evolution and weld formation during ultrasonic welding of Al alloy to Cu / H. T. Fujii, H. Endo, Y. S. Sato, H. Kokawa // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 139. – P. 233–240. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.03.010.
2. Shin Hyung-Seop, De Leon Michael. Mechanical performance and electrical resistance of ultrasonic welded multiple Cu-Al layers // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 241. – P. 141–153. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.004.
3. Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation / R. Lapovok, H. P. Ng, D. Tomus, Y. Estrin // *Scripta Materialia*. – 2012. – Vol. 66. – P. 1081–1084. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.03.004.
4. Powell C., Stillman H. Corrosion behavior of copper alloys used in marine aquaculture // *International Copper Association*. – 2009. – P. 1–3.
5. Callcut V. A. Aluminium bronzes for industrial use // *Metals and materials*. – 1989. – Vol. 5, No. 3. – P. 128–132.
6. 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting / T. A. Nesma, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, R. Hague // *Progress in Materials Science*. – 2019. – Vol. 106. – P. 100578. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
7. Laser-arc hybrid additive manufacturing of stainless steel with beam oscillation / V. Gong, Y. Meng, S. Zhang, Y. Zhang, X. Zeng, M. Gao // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 33. – P. 101180. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101180.
8. Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: Processing, microstructures, and mechanical properties / X. Cai, B. Dong, X. Yin,

- S. Lin, C. Fan, C. Yang // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 35. – P. 101344. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101344.
9. Study on the NiTi shape memory alloys in-situ synthesized by dual-wire-feed electron beam additive manufacturing / Ze Pu, Dong Du, Kaiming Wang, Guan Liu, Dongqi Zhang, Haoyu Zhang, Rui Xi, Xiebin Wang, Baohua Chang // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 26. – P. 102886. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102886.
10. Electron-beam additive manufacturing of high-nitrogen steel: Microstructure and tensile properties / S. Astafurov, E. Astafurova, K. Reunova, E. Melnikov, V. Panchenko, V. Moskvina, G. Maier, V. Rubtsov, E. Kolubaev // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 826. – P. 141951. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.141951.
11. The Structure Organization and Defect Formation of Cu-Al System Polymetallic Materials Produced by the Electron-Beam Additive Technology / A. Chumaevskii, T. Kalashnikova, A. Gusarova, E. Knjazhev, K. Kalashnikov, A. Panfilov // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). – 2020. – P. 1294–1298.
12. Production of Gradient Intermetallic Layers Based on Aluminum Alloy and Copper by Electron-beam Additive Technology / A. V. Chumaevskii, A. O. Panfilov, E. O. Knyazhev, A. P. Zykova, A. V. Gusarova, K. N. Kalashnikov, A. V. Vorontsov, N. L. Savchenko, S. Y. Nikonov, A. M. Cheremnov, V. E. Rubtsov, E. A. Kolubaev // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2021. – P. 19–31. – DOI: 10.17804/2410-9908.2021.6.019-031. – URL: [https://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6\\_342.html](https://dream-journal.org/issues/2021-6/2021-6_342.html)