

Received: 27.10.2022

Revised: 24.11.2022

Accepted: 23.12.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.065-075

**PRODUCTION OF METAL MATRIX COMPOSITES BASED
ON ALUMINUM-MANGANESE BRONZE AND NICKEL ALLOYS
BY WIRE-FEED ELECTRON-BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

A. V. Chumaevskii^{a),*}, A. O. Panfilov^{b)}, K. N. Kalashnikov^{c)}, A. P. Zykova^{d)},
T. A. Kalashnikova^{e)}, A. V. Vorontsov^{f)}, S. Yu. Nikonov^{g)}, E. N. Moskvichev^{h)},
V. M. Semenchukⁱ⁾, V. E. Rubtsov^{j)}, and E. A. Kolubaev^{k)}

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

- a)  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;
b)  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>  sso.spektr.asu@gmail.com;
d)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;
e)  <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>  gelombang@mail.ru;
f)  <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>  vav@ispms.ru;
g)  <https://orcid.org/0000-0002-5588-4718>  SergRFF@ngs.ru;
h)  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>  em_tsu@mail.ru;
i)  <https://orcid.org/0000-0002-7215-0505>  svm70@ispms.tsc.ru;
j)  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>  rvy@ispms.ru;
k)  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.ru

*Corresponding author. E-mail: tch7av@gmail.com

Address for correspondence: pr. Akademicheskiiy, 2/4, Tomsk, Russia
Tel.: +7 (961) 891 4149

Samples of composite materials based on BrAMts9-2 bronze with the introduction of the Udimet500 and Inconel625 nickel alloys were obtained by wire-feed electron-beam technology. The studies show that the structures of composites formed during printing, although fairly similar due to the same base of the alloys, have different features due to different combinations of alloying elements. The mechanical properties of the samples with the introduction of up to 15 % of the Udimet500 alloy are higher than those of the samples of the second material. With the introduction of 25 % of a nickel alloy, the strength is higher for the composite material samples with the introduction of the Inconel625 alloy. The microhardness of the samples with the introduction of 5 % of a nickel alloy is identical, the introduction of large volumes of a nickel alloy leads to the implementation of greater hardness in the samples with the introduction of the Inconel625 alloy due to the higher content of refractory materials. Relative elongation after rupture varies insignificantly for the samples of both types.

Keywords: electron-beam additive manufacture, metal matrix composites, intermetallics, microstructure, mechanical properties.

Acknowledgment

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00578. The equipment of the Nanotekh shared research facilities, ISPMS SB RAS, was used for the research.

References

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. Mukherjee T., Zuback J.S., De A., DebRoy T. Printability of alloys for additive manufacturing. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 19717. DOI: 10.1038/srep19717.
3. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 13, pp. 1628–1664. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.022.
4. Xu J., Zhou Q., Kong J., Peng Yong, Shun Guo, Jun Zhu, Fan Jikang. Solidification behavior and microstructure of Ti-(37–52) at % Al alloys synthesized in situ via dual-wire electron beam freeform fabrication. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 46, pp. 102113. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2021.102113.
5. Osipovich K.S., Chumaevskii A., Gusarova A.V., Kalashnikov K.N., Kolubaev Evgeny A. Mechanical properties of steel-copper polymetal manufactured by the wire-feed electron-beam additive technology. *High Temperature Material Processes*, 2020, vol. 24, pp. 91–98. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2020033790.
6. Afkhami S., Dabiri M., Alavi S.H., Björk T., Salminen A. Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 122, pp. 72–83. DOI: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.12.029.
7. Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Savchenko N.L., Moskvichev E.N., Utyaganova V.R., Kolubaev E.A., Smolin A.Y., Tarasov S.Y. Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 859, pp. 157824. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.
8. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Humbeeck J.V., Kruth J.-P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58 (9), pp. 3303–3312. DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.004.
9. Martin J.H., Yahata B.D., Hundley J.M., Mayer J.A., Schaedler T.A., Pollock T.M. 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature*, 2017, vol. 549 (7672), pp. 365–369. DOI: 10.1038/nature23894.
10. 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.
11. 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. *Diagnosics, 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
12. Astafurova E.G., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % dur-

ing Electron-Beam Additive Manufacturing. *Phys Mesomech*, 2022, vol. 25, No. 1., pp. 1–11. DOI: 10.1134/S1029959922010015.

Подана в журнал: 27.10.2022
УДК 539.25:621.791.14:620.186.12:620.17
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.065-075

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВО-МАРГАНЦЕВОЙ БРОНЗЫ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

А. В. Чумаевский^{а),*}, А. О. Панфилов^{б)}, К. Н. Калашников^{в)}, А. П. Зыкова^{г)},
Т. А. Калашникова^{д)}, А. В. Воронцов^{е)}, С. Ю. Никонов^{ж)}, Е. Н. Москвичев^{з)},
В. М. Семенчук^{и)}, В. Е. Рубцов^{к)}, Е. А. Колубаев^{л)}

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

- а)  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;
б)  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;
в)  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>  sso.spektr.asu@gmail.com;
г)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;
д)  <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>  gelombang@mail.ru;
е)  <https://orcid.org/0000-0002-4334-7616>  vav@ispms.ru;
ж)  <https://orcid.org/0000-0002-5588-4718>  SergRFF@ngs.ru;
з)  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>  em_tsu@mail.ru;
и)  <https://orcid.org/0000-0002-7215-0505>  svm70@ispms.tsc.ru;
к)  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>  rvy@ispms.ru;
л)  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: tch7av@gmail.com

Адрес для переписки: пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация
Тел.: +7 (961) 891-41-49

Методом проволоочной электронно-лучевой технологии получены образцы композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением при печати никелевых сплавов Udimet500 и Inconel625. Проведенные исследования показывают, что формируемая при печати структура композитов, хотя и имеет достаточно близкое строение по причине одинаковой основы сплавов, но и имеет различные особенности, обусловленные различными сочетаниями легирующих элементов. Механические свойства образцов с введением до 15 % сплава Udimet500 выше, чем у образцов второго материала. При введении 25 % никелевого сплава прочность выше у образцов композиционного материала с введением сплава Inconel625. Микротвердость образцов с введением 5 % никелевого сплава идентична, введение больших объемов никелевого сплава приводит к реализации большей твердости у образцов с введением сплава Inconel625 за счет большего содержания тугоплавких материалов. Относительное удлинение после разрыва для образцов обоих типов изменяется незначительно.

Ключевые слова: электронно-лучевое аддитивное производство, композиционные материалы с металлической матрицей, интерметаллиды, микроструктура, механические свойства.

1. Введение

В настоящее время развитие аддитивных технологий позволяет значительно расширить номенклатуру производимых изделий, материалов или конструкций промышленного, авиационного или ракетно-космического назначения [1, 2]. Используемые технологии 3D-печати позволяют не только получать изделия сложной формы и различного размера, но

и формировать в них материалы с настраиваемой в широком диапазоне структурой с реализацией уникальных сочетаний структуры и свойств получаемых изделий [3, 4]. К таким свойствам могут относиться повышенная коррозионная стойкость [5], прочность, пластичность, циклическая прочность [6], износостойкость [7] и т.д. При этом для получения материалов с различной структурой возможно использованием как порошковых [8, 9], так и проволочных [10, 11] технологий. Порошковые технологии позволяют получать наиболее мелкодисперсные структуры, в то время как проволочные технологии обладают большей экономичностью и производительностью. Также для получения композиционных материалов большое значение имеет возможность использования, как чистых металлов, так и сплавов с различным сочетанием легирующих элементов. Причем плавное введение в ванну расплава компонентов может позволить в широком диапазоне регулировать структуру и свойства формируемых изделий, особенно с использованием проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии [12]. До настоящего времени исследования влияния на формирование композиционных материалов данным методом легирующих элементов различных сплавов проведено не было. По этой причине работа направлена на исследование закономерностей формирования структуры в композиционных материалах на основе алюминий-марганцевой бронзы с введением при печати 5–25 % никелевых сплавов Udimet500 и Inconel625, отличающихся содержанием легирующих элементов – хрома, кобальта, молибдена, титана и ниобия.

2. Материалы и методы

Композиционные материалы получали методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии с совмещением подачи основного металла в виде алюминий-марганцевой бронзы БрАМц9-2 и вводимого в ее объем сплава Udimet500 или Inconel625 (таблица). Количество вводимых никелевых сплавов составляло 5, 15, 25 об.%. Печать осуществляли по схеме, приведенной на рис. 1. Образцы 1 формировали на стальной подложке 2 путем подачи проволоки 4 через сопло 3. Плавление проволочных филаментов производилась электронным пучком 5 от источника 6, вводимого в зону печати через систему магнитной фокусировки 7. Филаменты формировали ванну расплава 8 с управляемым составом за счет регулирования объема вводимых филаментов от податчиков 9. Ускоряющее напряжение при печати составляло 30 кВ. Значения тока пучка подбирали эмпирически. При печати композиционного материала с введением сплава Udimet500 ток пучка составлял 72,0 мА в нижней части образца и 44,0 мА в верхней части. Печать образца с введением сплава Inconel625 осуществляли при токе пучка 77,5 мА в нижней и 46,0 мА в верхней части. Такое положение связано с накоплением тепла при последовательном нанесении филаментов.

Химический состав сплавов, использованных для получения композиционных материалов, в соответствии с технической документацией

Материал	Концентрация, мас. %									
	Al	Mn	Fe	Cu	Cr	Co	Mo	Ti	Nb	Ni
БрАМц9-2	8–10	1,5–2,5	–	Ост.	–	–	–	–	–	–
Udimet500	2,9	–	–	–	17,5	16,5	4,0	3,9	–	Ост.
Inconel625	0,4	0,5	5,0	–	20,0–23,0	1,0	8,0–10,0	0,4	3,15–4,15	Ост.

Исследование микроструктуры проводилось методом оптической микроскопии на металлографических микроскопах Altami MET 1С и Olympus LEXT 4100. Измерение микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 по всей высоте стенки. Нагрузка при измерении микротвердости составляла 50 гр. Механические испытания

При увеличении объемной доли вводимого в бронзу никелевого сплава до 10 % происходит качественное изменение в структуре и свойствах композита. Объемная доля бронзовой матрицы уменьшается (1; рис. 2 б, д и рис. 3 б). Не выявляется образования частиц β -Cu₃Al, что обусловлено увеличением содержания никеля и образованием крупных частиц NiAl, а также агломератов частиц данной фазы (4; рис. 2 б, д и рис. 3 б). Также повышается содержание частиц вторичных фаз на основе хрома и молибдена (3; рис. 2 б, д и рис. 3 б).

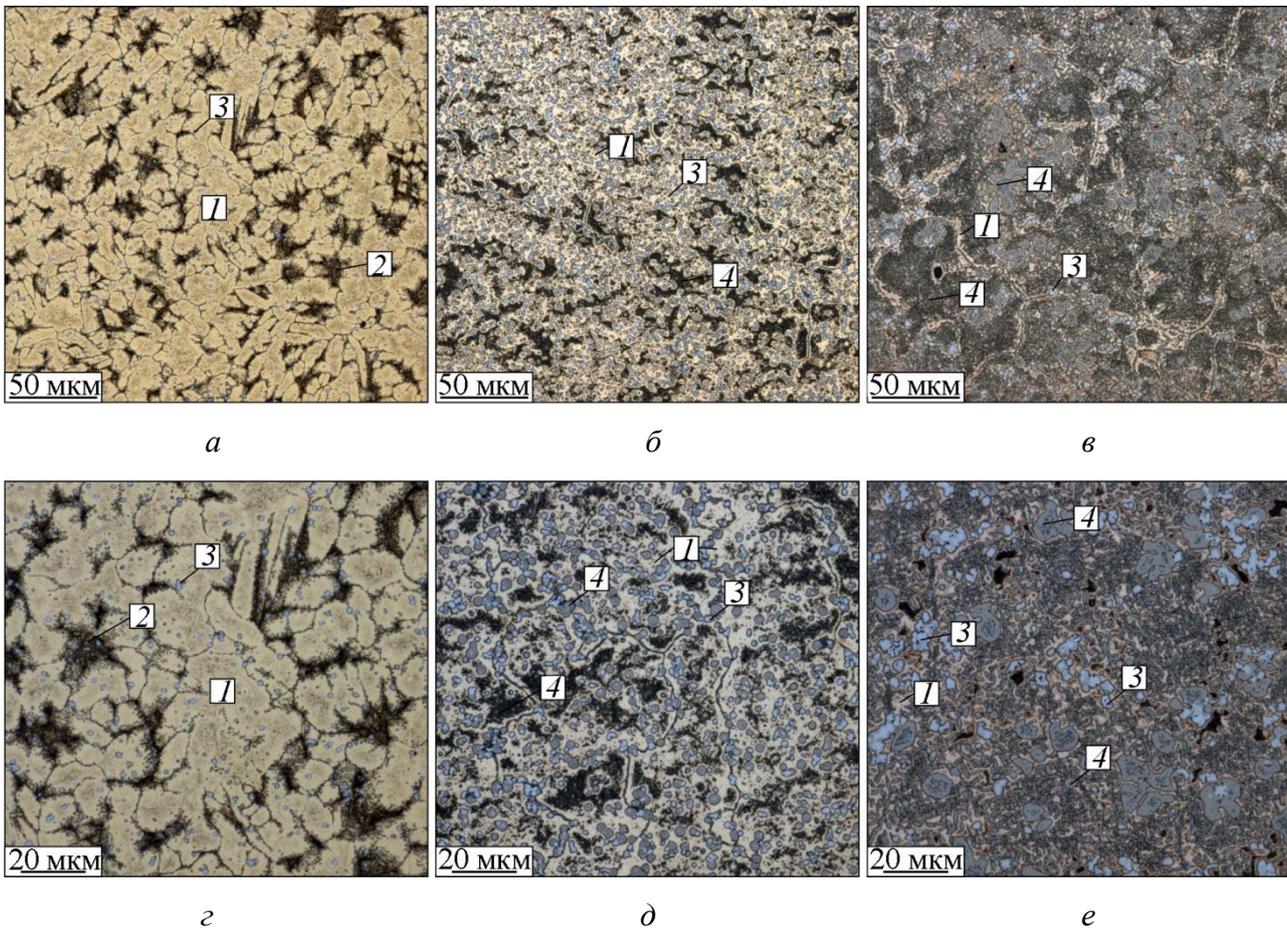


Рис. 2. Структура образцов композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением при печати 5 (а, г), 15 (б, д) и 25 (в, е) об.% никелевого сплава Udimet500: 1 – твердый раствор Cu (Ni, Al); 2 – β -Cu₃Al+AlNi; 3 – вторичные фазы на основе Cr и Mo; 4 – интерметаллидные фазы AlNi

При введении в алюминиево-марганцевую бронзу 25 % никелевого сплава происходит образование еще более крупных частиц NiAl размером 20 мкм и более (4; рис. 2 в, е и рис. 3 в). Объем бронзовой матрицы снижается и увеличивается объемная доля частиц на основе тугоплавких металлов (Cr, Mo) и агломератов мелкодисперсных частиц NiAl. Причем твердый раствор Cu (Al, Ni) при данном содержании сплава Udimet500 формируется в виде тонких прослоек между частицами интерметаллидных фаз и твердых растворов на основе тугоплавких металлов.

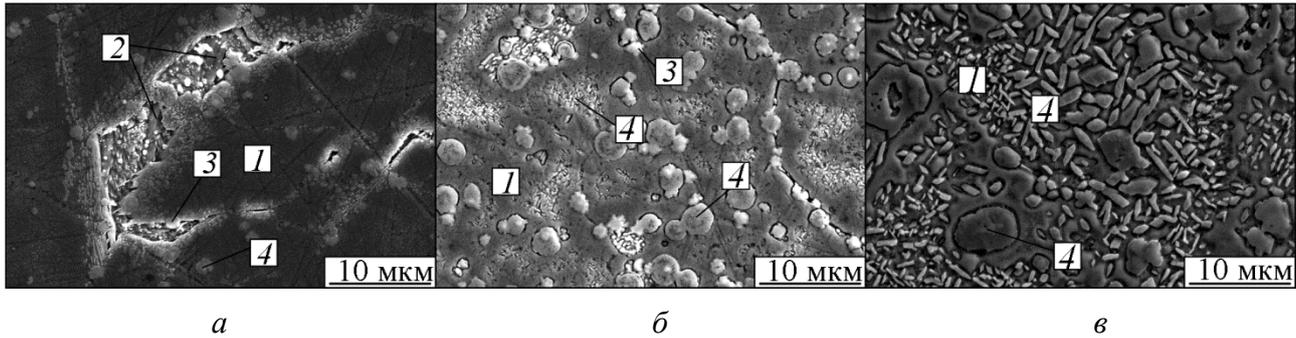


Рис. 3. Растровые электронные изображения структуры образцов композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением при печати 5 (а), 15 (б) и 25 (в) об.% никелевого сплава Udimet500: 1 – твердый раствор Cu (Ni, Al); 2 – β -Cu₃Al+AlNi; 3 – вторичные фазы на основе Cr и Mo; 4 – интерметаллидные фазы AlNi

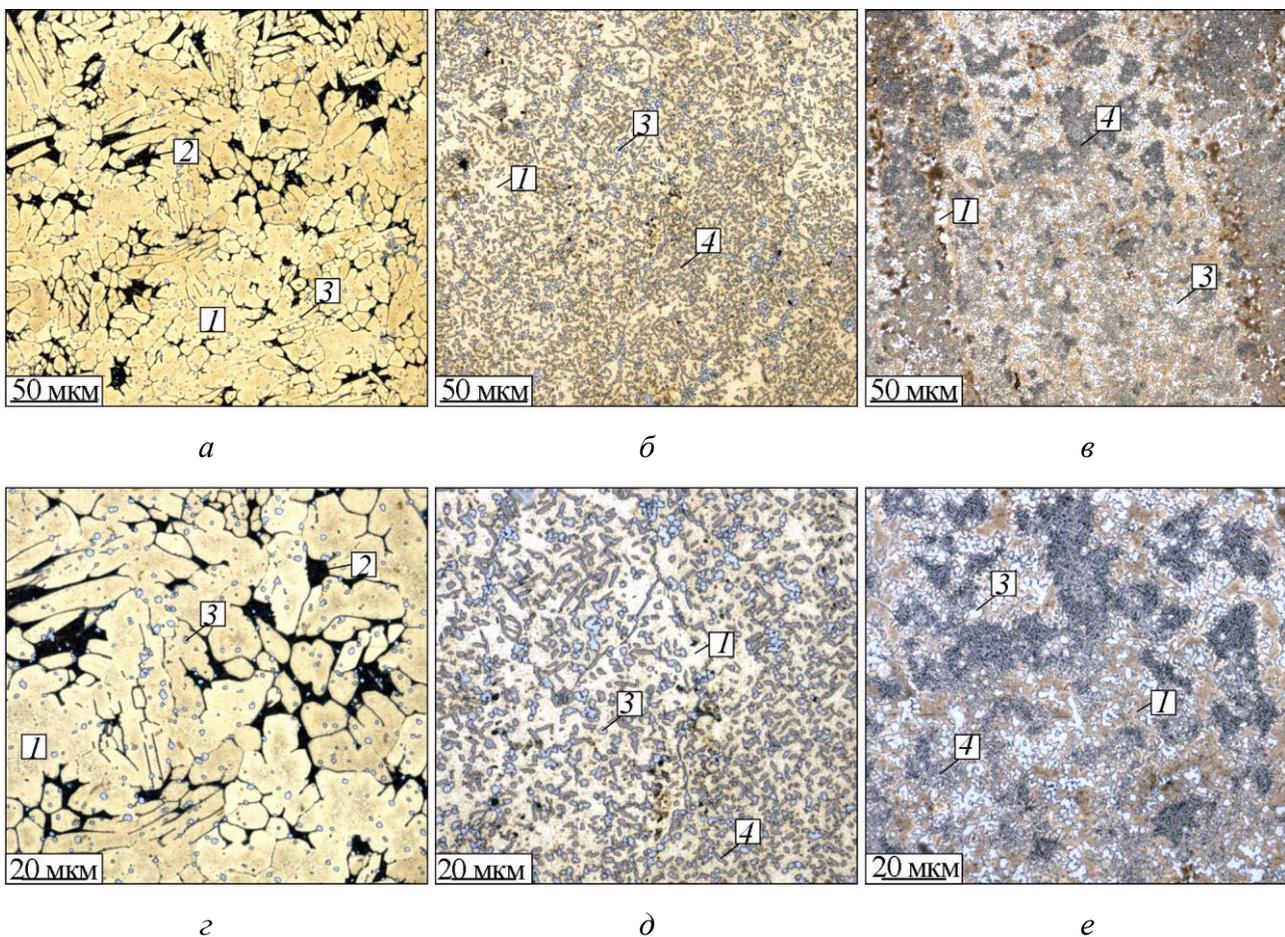


Рис. 4. Структура образцов композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением при печати 5 (а, з), 15 (б, д) и 25 (в, е) об.% никелевого сплава Udimet500: 1 – твердый раствор Cu (Ni, Al); 2 – β -Cu₃Al+AlNi; 3 – вторичные фазы на основе Nb, Cr и Mo; 4 – интерметаллидные фазы AlNi

Близкая по типу структура формируется при введении в объем бронзы сплава Inconel625 (рис. 4 и 5). При введении 5 % никелевого сплава структура аналогична формируемой при печати образцов предыдущего типа. Основу составляет твердорастворная матрица состава Cu(Al, Ni), зерна которой также представлены в виде ламелей (1; рис. 4 а, з и рис. 5 а).

Вторым элементом являются межзеренные агломераты частиц β -фазы Cu_3Al и интерметаллидов AlNi (2; рис. 4 *a, z* и рис. 5 *a*). Последним элементом структуры являются частицы вторичных фаз на основе хрома, молибдена и ниобия (3; рис. 4 *a, z* и рис. 5 *a*).

При введении 10 % сплава Inconel625 в объем бронзы БрАМц9-2 аналогично с образцами первого типа не образуется частиц β -фазы Cu_3Al (рис. 4 *б, д*, и рис. 5 *б*). Но при этом не образуется и агломератов частиц NiAl . Основными структурными элементами являются твердорастворная матрица Cu (Ni , Al), частицы интерметаллидов AlNi и вторичные фазы на основе Nb , Cr и Mo . Увеличение объемной доли никелевого сплава до 25 % приводит к формированию агломератов частиц NiAl (4; рис. 4 *в, e* и рис. 5 *в*). В остальном качественно не изменяется фазовый состав композиционного материала, а увеличивается только объемная доля упрочняющих фаз и снижается объемная доля матрицы Cu (Ni , Al).

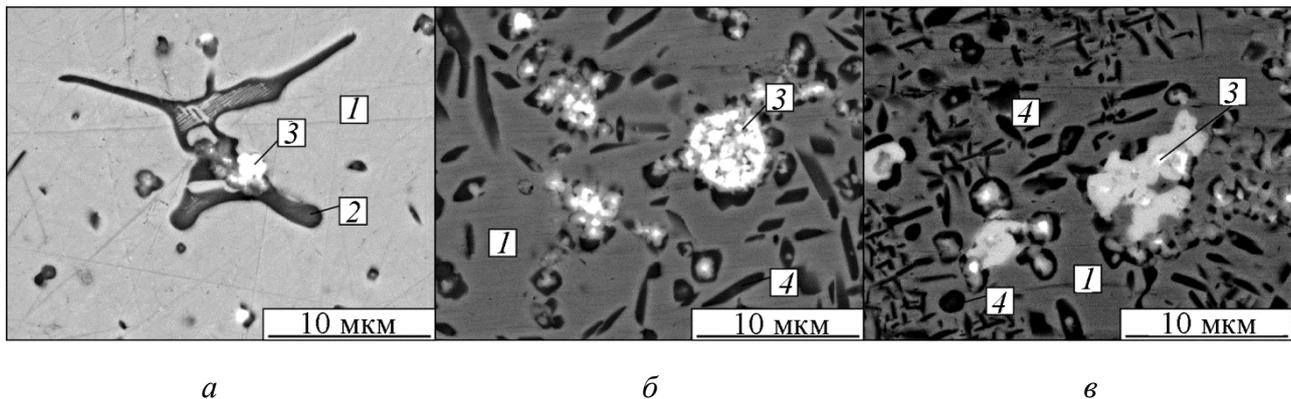


Рис. 5. Растровые электронные изображения структуры образцов композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением при печати 5 (*a*), 15 (*б*) и 25 (*в*) об.% никелевого сплава Udimet500: 1 – твердый раствор Cu (Ni , Al); 2 – $\beta\text{-Cu}_3\text{Al}+\text{AlNi}$; 3 – вторичные фазы на основе Nb , Cr и Mo ; 4 – интерметаллидные фазы AlNi

Механические испытания и измерения микротвердости полученных образцов показывают, что влияние различных никелевых сплавов на свойства композитов является достаточно неоднозначным (рис. 6). Предел прочности образцов чистой бронзы БрАМц9-2 после печати составляет 455 МПа (рис. 6 *a*). При введении 5 % сплава Udimet500 предел прочности повышается до 580 МПа, а при введении 5 % сплава Inconel625 до 520 МПа. При увеличении объемной доли никелевых сплавов до 10 % предел прочности композитов увеличивается до 600 МПа и 545 МПа. После внедрения 25 % упрочняющего материала предел прочности увеличивается до 675 МПа и 790 МПа для композитов со сплавом Udimet500 и Inconel625 соответственно. Пластичность образцов композиционных материалов при введении обоих сплавов постепенно снижается с 55 % до 10–11 % (рис. 6 *б*). Микротвердость образцов с введением 5 % обоих сплавов находится на одном уровне (рис. 6 *в*). Увеличение объемной доли приводит к большей степени упрочнения композита сплавом Inconel625, чем сплавом Udimet500, что обусловлено большей долей тугоплавких упрочняющих компонентов в сплаве Inconel625. В целом, получение композитов с введением никелевого сплава Inconel 625 является более эффективным, но при введении 5–10 % никелевых сплавов предел прочности выше у композитов с введением сплава Udimet500.

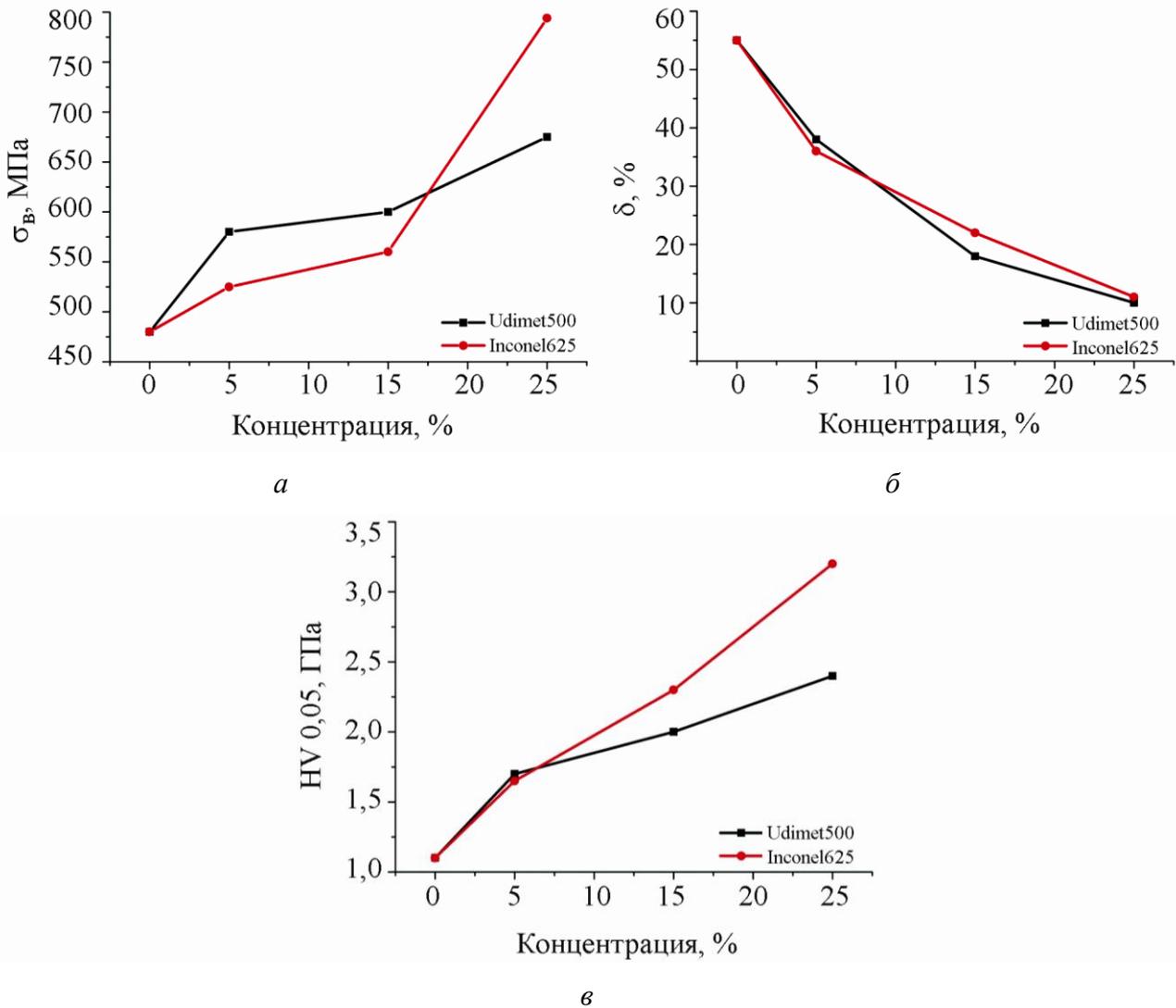


Рис. 6. Изменение временного сопротивления (а) и пластичности (б) при растяжении, а также микротвердости (в) в материале образцов при изменении содержания никелевых сплавов Udimet500 и Inconel625 в бронзовой матрице

4. Заключение

Результаты проведенных экспериментальных работ по получению композиционных материалов с металлической матрицей на основе бронзы БрАМц9-2 и никелевых сплавов Udimet500 или Inconel625 показывают, что формирование структуры в них носит сложный и неоднородный характер. На формирование структуры образцов оказывает влияние как основной компонент сплава – никель, так и легирующие элементы – хром, кобальт, молибден и ниобий. Различия в составе сплавов Udimet500 и Inconel 625 практически не влияют на пластичности, которая снижается с увеличением содержания упрочняющего компонента. Введение 5 % никелевых сплавов приводит к формированию материала с близкими значениями микротвердости. Дальнейшее увеличение концентрации никеля приводит к тому, что при введении сплава Inconel625 значения твердости поднимаются до 325 HV 0,05, в то время как при введении сплава Udimet500 они не превышают 240 HV 0,05. По-видимому, это обуславливает большее содержание молибдена и наличие ниобия в сплаве Inconel625. Влияние введения данных сплавов на значения предела прочности является неоднозначным. При содержании 5–15 % упроч-

няющего компонента прочность выше у композита с введением сплава Udimet500, а при 25 % наиболее прочным является материал с введением сплава Inconel 625.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00578.

Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ».

Литература

1. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J. S. Zuback, A. De, T. DebRoy // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 19717. – DOI: 10.1038/srep19717.
3. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 13. – P. 1628–1664. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.022.
4. Solidification behavior and microstructure of Ti-(37–52) at % Al alloys synthesized in situ via dual-wire electron beam freeform fabrication / Junqiang Xu, Qi Zhou, Jian Kong, Yong Peng, Guo Shun, Zhu Jun, and Jikang Fan // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 46. – P. 102113. – DOI: 10.1016/J.ADDMA.2021.102113.
5. Mechanical properties of steel-copper polymetal manufactured by the wire-feed electron-beam additive technology / K. S. Osipovich, A. Chumaevskii, A. V. Gusarova, K. N. Kalashnikov, Evgeny A. Kolubaev // High Temperature Material Processes. – 2020. – Vol. 24. – P. 91–98. – DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2020033790.
6. Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting / S. Afkhami, M. Dabiri, S. Alavi, T. Björk, A. Salminen // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 122. – P. 72–83. – DOI: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.12.029.
7. Characterization of Gradient CuAl-B4C Composites Additively Manufactured Using a Combination of Wire-Feed and Powder-Bed Electron Beam Deposition Methods / A. V. Filippov, E. S. Khoroshko, N. N. Shamarin, N. L. Savchenko, E. N. Moskvichev, V. R. Utyaganova, E. A. Kolubaev, A. Y. Smolin and S. Y. Tarasov // J. Alloys Compd. – 2021. – Vol. 859. – P. 157824. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.
8. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Humbeeck, J. Kruth // Acta Materialia. – 2010. – Vol. 58 (9). – P. 3303–3312. – DOI: 10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.004.
9. 3D printing of high-strength aluminium alloys / J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, T. M. Pollock // Nature. – 2017. – Vol. 549 (7672). – P. 365–369. – DOI: 10.1038/nature23894.
10. 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.
11. 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 Me-

chanics 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

12. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms $C + N = 1.9$ wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing / E. G. Astafurova, S. V. Astafurov, K. A. Reunova, E. V. Melnikov, V. A. Moskvina, M. Yu. Panchenko, G. G. Maier, V. E. Rubtsov, E. A. Kolubaev // *Phys Mesomech*, 2022. – Vol. 25, No. 1. – P. 1–11.– DOI: 10.1134/S1029959922010015.