

Received: 26.10.2022

Revised: 24.11.2022

Accepted: 23.12.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.076-085

## OBTAINING A STEEL-BASED METAL MATRIX COMPOSITE BY WIRE-FEED ADDITIVE ELECTRON BEAM MANUFACTURING WITH THE INTRODUCTION OF TUNGSTEN POWDER

A. V. Chumaevskii<sup>a)</sup>\*, N. N. Shamarin<sup>b)</sup>, A. O. Panfilov<sup>c)</sup>, A. P. Zykova<sup>d)</sup>, A. V. Filippov<sup>e)</sup>,  
E. N. Moskvichev<sup>f)</sup>, V. E. Rubtsov<sup>g)</sup>, and E. A. Kolubaev<sup>h)</sup>

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

- <sup>a)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;  
<sup>b)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>  shamarin.nik@gmail.com;  
<sup>c)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;  
<sup>d)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;  
<sup>e)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>  avf@ispms.tsc.ru;  
<sup>f)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>  em\_tsu@mail.ru;  
<sup>g)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>  rvy@ispms.tsc.ru;  
<sup>h)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.tsc.ru

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

Address for correspondence: pr. Akademicheskoy, 2/4, Tomsk, 634055, Russia

Tel.: +7 (961) 891 4149

Wire-feed electron-beam additive technology is used to produce samples of a composite material based on the 40Cr9Si2 steel by additionally introducing tungsten powder during printing. Controlling the feed of wire and powder makes it possible to form composite structures in the surface layers of the samples while maintaining the sample bulks with high strength and plasticity. The content of tungsten in the surface layer increases smoothly. This has a positive effect on the structure of the samples and prevents cracking or delamination at the boundary between the base metal and the surface layer. The tensile strength of the layers decreases with the introduction of tungsten in comparison with the bulk of the sample. In this case, the surface layers are characterized by a multiple increase in wear resistance, especially at elevated test temperatures.

**Keywords:** electron-beam additive manufacturing, steel–tungsten composite, microstructure, mechanical properties, friction and wear.

### Acknowledgment

*This work was carried out within the framework of a grant from the President of the Russian Federation for the state support of leading scientific schools, No. NSh-1174.2022.4, and the state assignment for the ISPMS SB RAS, subject number FWRW-2022-0004. The equipment of the Nanotekh shared research facilities, ISPMS SB RAS, was used for the research.*

### References

1. 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)

2. 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.

3. 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.

4. Zykova A., Chumaevskii A., Vorontsov A., Kalashnikov K., Gurianov D., Gusarova A., Kolubaev E.A. Evolution of microstructure and properties of Fe-Cu, manufactured by electron beam additive manufacturing with subsequent friction stir processing. *Materials Letters*, 2022, vol. 307, pp. 131023. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131023.

5. 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.

6. 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.

7. Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Kalashnikova T.A., Kalashnikov K.N., Chumaevskii A.V., and Nikonov S.Yu. Manufacturing of Cu-Ni and Fe-Cu-Ni polymetallic materials by the electron-beam additive technology. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2310, pp. 020242. DOI: 10.1063/5.0034751.

8. 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.

9. 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 % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Phys Mesomech*, 2022, vol. 25, pp. 1–11. DOI: 10.1134/S1029959922010015.

10. 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*, 202, vol. 859, pp. 157824. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.

Подана в журнал: 26.10.2022  
УДК 539.25:621.791.14:620.186.12:620.17  
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.076-085

## ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СТАЛИ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ВВЕДЕНИЕМ ПОРОШКА ВОЛЬФРАМА

А. В. Чумаевский<sup>а)</sup>\*, Н. Н. Шамарин<sup>б)</sup>, А. О. Панфилов<sup>в)</sup>, А. П. Зыкова<sup>г)</sup>, А. В. Филиппов<sup>д)</sup>,  
Е. Н. Москвичев<sup>е)</sup>, В. Е. Рубцов<sup>ж)</sup>, Е. А. Колубаев<sup>з)</sup>

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

- <sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>  tch7av@gmail.com;  
<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4649-6465>  shamarin.nik@gmail.com;  
<sup>в)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>  alexpl@ispms.ru;  
<sup>г)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8779-3784>  zykovaap@mail.ru;  
<sup>д)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0487-8382>  avf@ispms.tsc.ru;  
<sup>е)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>  em\_tsu@mail.ru;  
<sup>ж)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>  rvy@ispms.tsc.ru;  
<sup>з)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>  eak@ispms.tsc.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 проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии были получены образцы композиционного материала на основе стали 40Х9С2 посредством дополнительного введения при печати порошка вольфрама. Управление подачей проволоки и порошка позволило сформировать композитные структуры в поверхностных слоях образцов с сохранением основного объема с высокой прочностью и пластичностью. Содержание вольфрама в поверхностном слое увеличивается плавно, что положительно влияет на структуру образцов и препятствует образованию трещин или расслоений на границе основного металла и поверхностного слоя. Временное сопротивление при растяжении слоев с введением вольфрама снижается по сравнению с основным объемом образца. При этом, для поверхностных слоев характерно многократное увеличение износостойкости, особенно при повышенных температурах испытания.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое аддитивное производство, композит «сталь–вольфрам», микроструктура, механические свойства, трение и износ.

### 1. Введение

Современные разработки в области получения образцов из металлов и сплавов с использованием аддитивных технологий позволяют получать изделия с различными свойствами основного объема и поверхностных слоев [1, 2]. При этом, возможно получение деталей с повышенными коррозионными свойствами поверхностного слоя [3], увеличенной износостойкостью [4], прочностью [5] или с организацией в объеме изделия различного по величине и протяженности структурного градиента [6, 7]. Для получения изделий трибологического назначения в промышленном производстве широко применяются различные бронзы, композиционные материалы и стали. Одной из значимых областей промышленного применения изделий из металлов и сплавов является из-

готовление подшипников скольжения, работающих в условиях высокотемпературного или высокоскоростного трения. При трении в условиях повышенных температур существенное значение имеет как выбор материала поверхности детали, так и выбор основного объема, который должен иметь относительно высокие механические свойства при повышенных температурах. Поэтому различные применяемые для трибосопряжений материалы не подходят для таких условий, так как при температурах до 300 °С многие материалы испытывают существенное разупрочнение. В то же время и свойства поверхностных слоев имеют особенное значение в данном случае, так как большинство металлов при высоких температурах испытывают схватывание при трении в отсутствие смазочного слоя. К наиболее подходящим материалам для изготовления деталей трибосопряжений, работающих при повышенных температурах, относятся жаропрочные стали (на сталь 40X9C2). Такие стали могут сохранять высокие значения механических свойств при температурах до 400–600 °С. Но трибологические свойства данных сталей при повышенных температурах не настолько высокие и требуют улучшения для стабильной работы. Для повышения износостойкости сталей при высоких температурах хорошо подходит их легирование молибденом или вольфрамом – достаточно дорогостоящими металлами. Насыщение поверхности изделия данными элементами с использованием аддитивных технологий может способствовать как получению износостойкого поверхностного слоя, так и рациональному расходованию ресурсов. Достаточно экономичной технологией 3D-печати является высокопроизводительная проволочная электронно-лучевая технология [8, 9]. Она интенсивно развивается в настоящее время и может применяться в сочетании с использованием порошков для получения износостойких поверхностных слоев на основе различных металлов и сплавов [10]. По этой причине в работе были получены износостойкие поверхностные слои на основе стали 40X9C2 с введением при печати порошка вольфрама.

## 2. Материалы и методы

Получение композитов с металлической матрицей производили на экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). Печать осуществляли по схеме, приведенной на рис. 1. Образцы 1 с композитной структурой получали путем плавления металла в ванне расплава 2 и его послойного нанесения. Подачу стали осуществляли в виде проволоки 3, а введение вольфрама – в виде порошка 4 послойно, таким образом, чтобы сталь наносилась поверх порошка, и производили перемешивание в ванне расплава. Источником энергии являлся электронный пучок 5, который вводили в зону печати через систему магнитной фокусировки 6 и генерировали электронной пушкой 7. После получения экспериментальных образцов с использованием электроэрозионной резки следовало получение образцов для механических испытаний композиционного материала 8 и основного металла 9, а также образцов для исследования трибологических свойств 10 и 11. При печати для одновременного оплавления предыдущего слоя и плавления порошка и проволоки использовали развертку пучка в виде эллипса. Ускоряющее напряжение составляло 30 кВ, ток пучка при печати композита – 45 мА. Порошок вольфрама вводили в поверхностные слои таким образом, чтобы его содержание в них составляло 6,5–8,5 вес.%. При печати проводили дополнительное перемешивание порошка в стали за счет повторного проплавления каждого слоя сканированием поверхности электронным пучком.

Трибологические испытания на возвратно-поступательное трение производили на трибометре Tribotechnic. Нагрузка при испытании составляла 12 Н, скорость скольжения 10 мм/с. В качестве контртела использовали шарик из стали ШХ15 диаметром 5 мм. Продолжительность испытания составляла 60 мин. Величину износа определяли по поперечному

сечению дорожки трения. Исследование макро- и микроструктуры проводили методом оптической микроскопии на металлографических микроскопах Altami MET 1С и Olympus LEXT 4100. Структурные исследования, совмещенные с анализом химического состава, производили на растровом электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Apreo S LoVac. Измерение микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 по всей толщине образца. Механические испытания на статическое растяжение проводили на испытательной машине УТС-110М-100-1У.

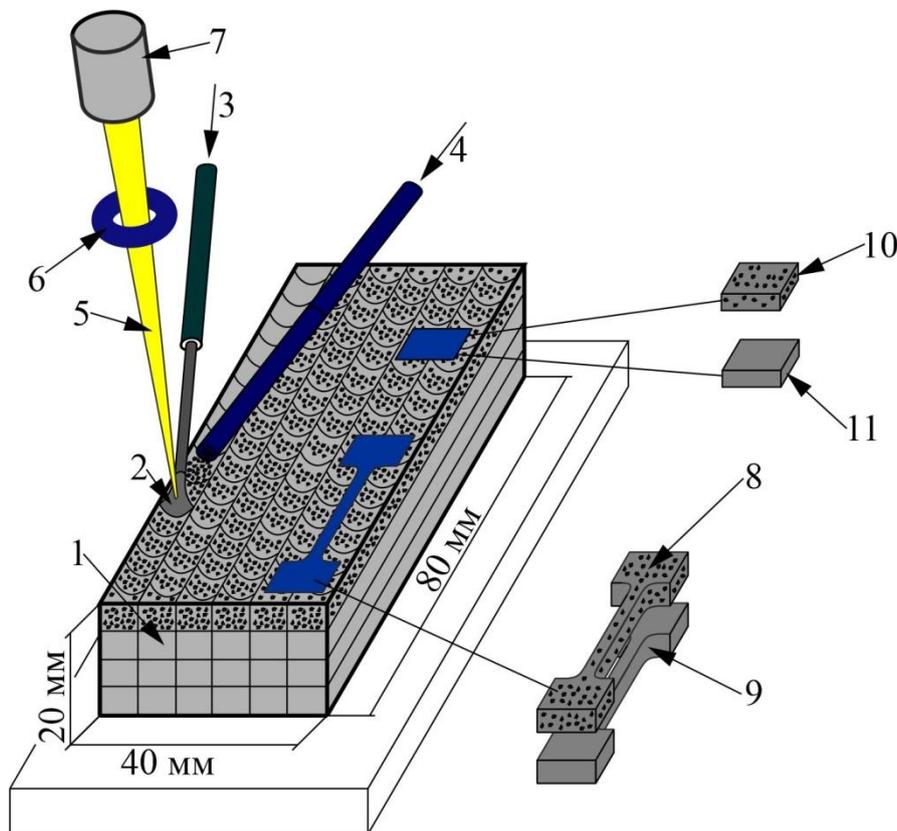


Рис. 1. Схема получения композиционного материала с металлической матрицей на основе стали с введением порошка вольфрама

### 3. Результаты с обсуждение

Макроструктура после печати образцов с модифицированным поверхностным слоем представлена типичным строением с ярко выраженным очертанием ванн расплава на каждом слое (рис. 2 а). Четко разделяется зона основного металла 1, напечатанного без введения порошка, и зона композиционного материала поверхностного слоя 2. Дефектов в виде пор, трещин или расслоений, характерных для печати образцов с неоптимальным сочетанием параметров процесса, не наблюдается. Внутренняя структура композитного слоя представлена дендритным строением (рис. 2 б), характерным для большинства напечатанных методом электронно-лучевой печати материалов. Она состоит из дендритов стали 3 с обособленными междендритными областями 4. Крупных агломератов порошков вольфрама или больших частиц не выявлено, что свидетельствует о хорошем взаимном сплавлении наносимого материала в виде порошка и проволоки.

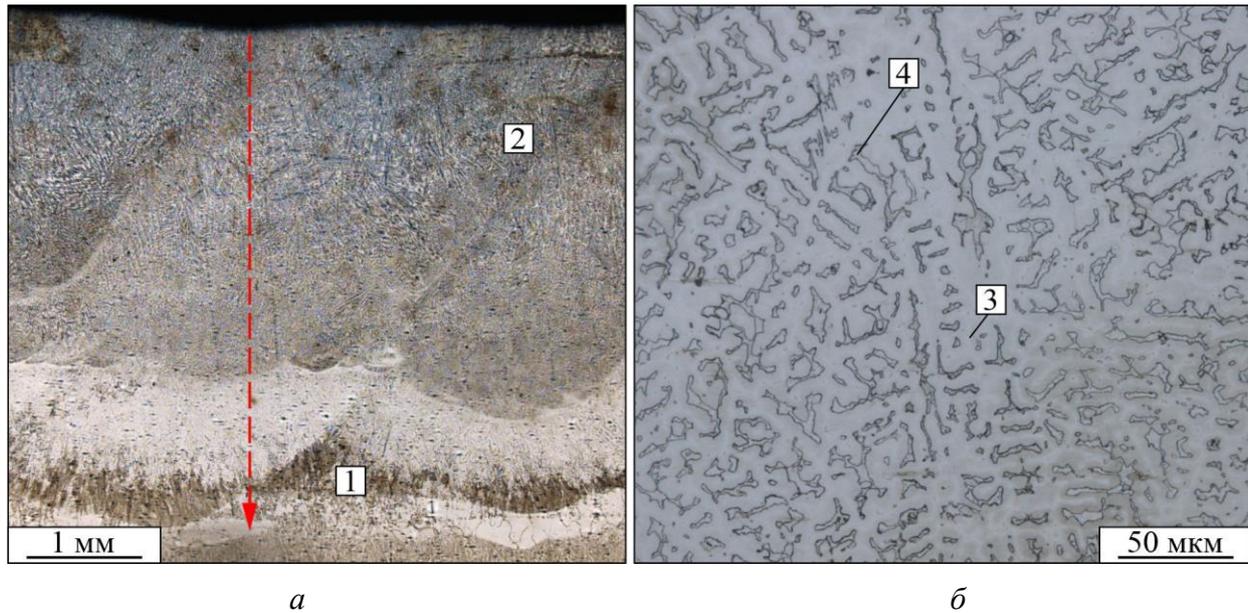


Рис. 2. Макроструктура образца полученного композита (а) и увеличенное изображение структуры поверхностного слоя (б): 1 – основной объем материала образца; 2 – поверхностный слой, упрочненный вольфрамом; 3 – дендриты стали; 4 – междендритные области

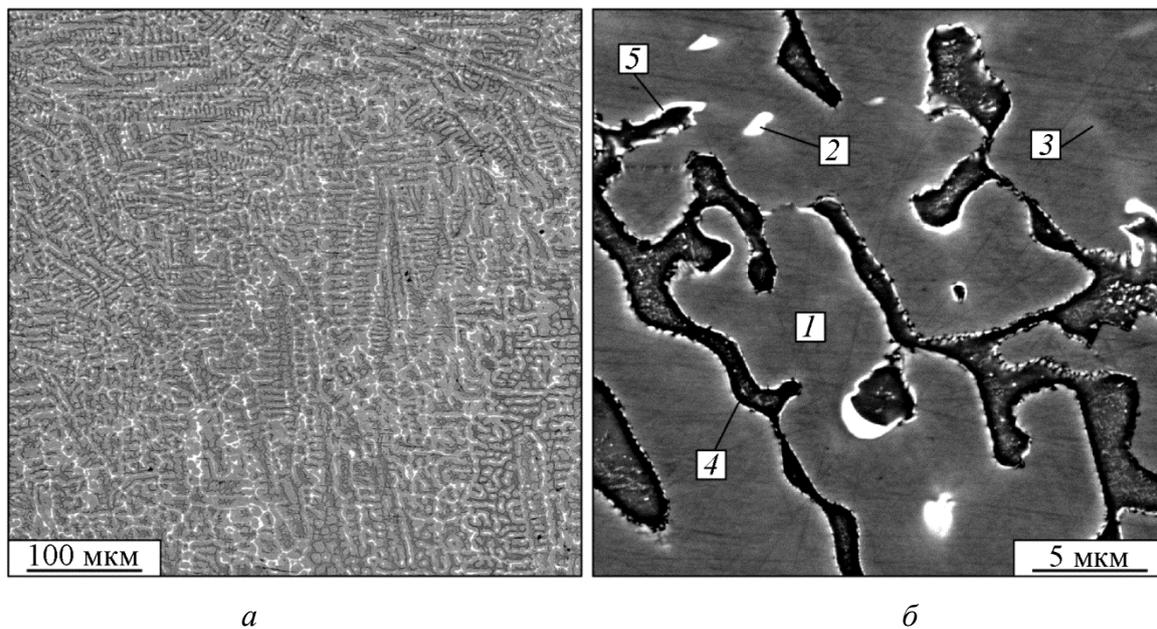


Рис. 3. Макроскопическое растровое электронное изображение (а) и увеличенное изображение (б) поверхностных слоев композиционного материала: 1 – дендриты стали; 2 – частицы вольфрама; 3 – области, обогащенные вольфрамом; 4 – междендритные области с мелкодисперсными частицами вольфрама; 5 – слои вольфрама по границам дендритов

Результаты исследований с применением растровой электронной микроскопии в режиме BSE (back scattered electrons, детектор обратно-рассеянных электронов) показывают, что распределение вольфрама в поверхностных слоях достаточно неравномерно и в разной степени представлено внутри дендритов стали и между ними (рис. 3 а). Большая объемная доля крупных частиц вольфрама или областей им обогащенных приходится на внутреннюю часть осей дендритов, в то время как между дендритами области обеднены вольфрамом.

Растровые электронные изображения при большом увеличении, совместно с энергодисперсионным анализом позволяют установить, что объем материала разделяется на несколько характерных областей (рис. 3 б). Внутренний объем осей дендритов преимущественно состоит из зон с небольшим содержанием вольфрама 1. Ближе к центру осей содержатся частицы вольфрама 2 и области, насыщенные вольфрамом 3. Междендритные области хотя и не выявляют крупных областей с повышенным содержанием вольфрама, но при этом содержат большое количество мелких частиц 4. На границах осей дендритов и междендритных зон можно выделить образование небольших прослоек с высоким содержанием вольфрама 5.

Исследование распределения химических элементов с картированием состава, полученным в процессе исследований на растровом электронном микроскопе, показывает, что имеется также ряд закономерностей в распределении легирующих элементов стали и вводимого вольфрама (рис. 4). Относительно равномерное распределение характерно только для железа (рис. 4 б). При этом локализация областей, обогащенных хромом, кремнием и вольфрамом, достаточно близка и соответствует, как было описано ранее, центральным областям осей дендритов (рис. 3 и 4 в–д).

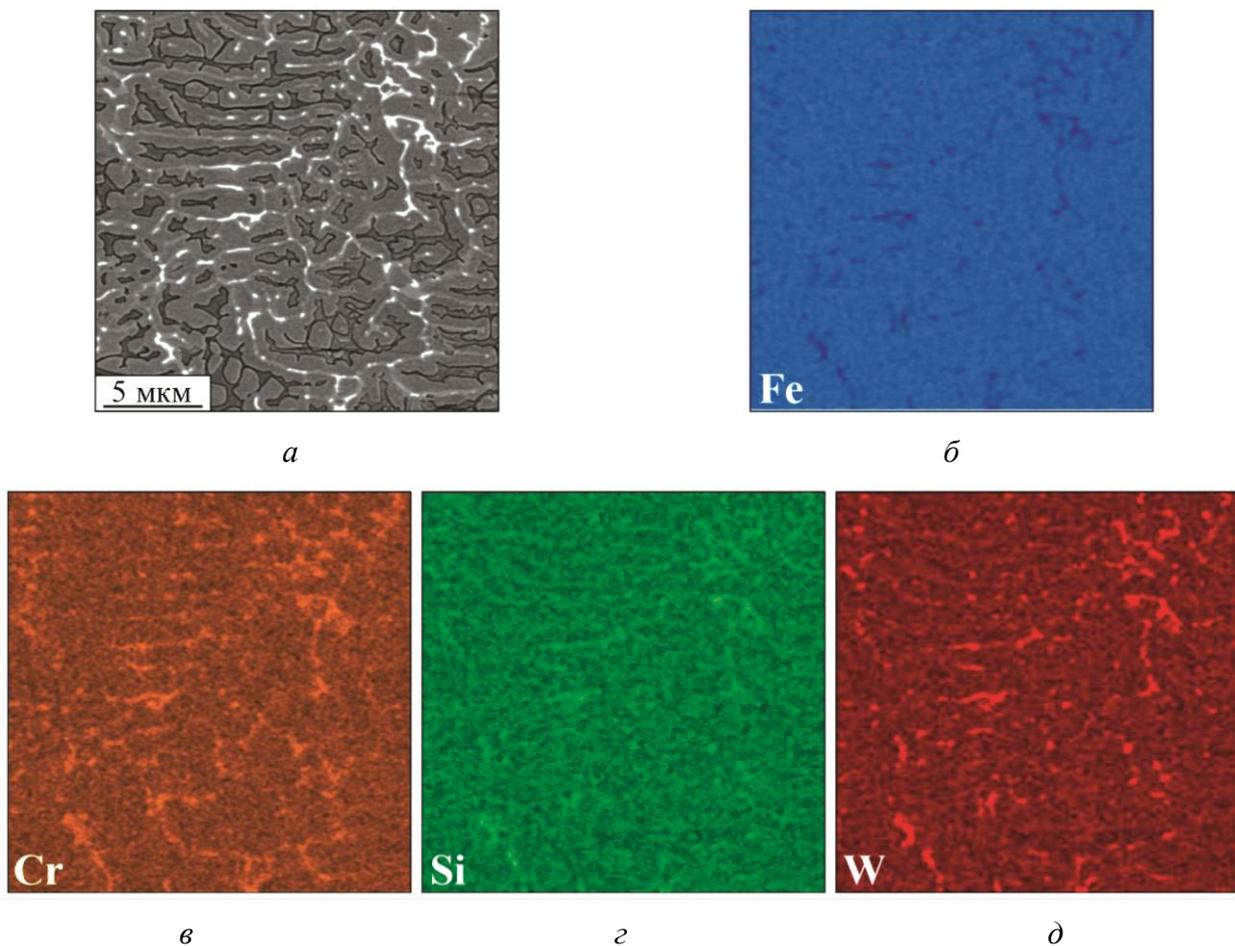


Рис. 4. Растровое электронное изображение (а) и карты распределения химических элементов на участке поверхностного слоя (б–д)

Количественный анализ распределения химических элементов в поверхностном слое показывает, что в поверхностном слое содержание вольфрама колеблется от 7 % до 8,5 %, в среднем составляя порядка 7 % в слое толщиной 1 мм (рис. 5 а). На удалении 0,5 мм от данного слоя содержание вольфрама составляет порядка 5 %, после чего оно плавно убывает

и на расстоянии 2,0 мм от поверхности образца его содержание становится равно 0. Содержание железа и хрома в поверхностном слое ожидается убывает за счет внедрения вольфрама, а содержание кремния находится практически на одном уровне с основным объемом напечатанного образца.

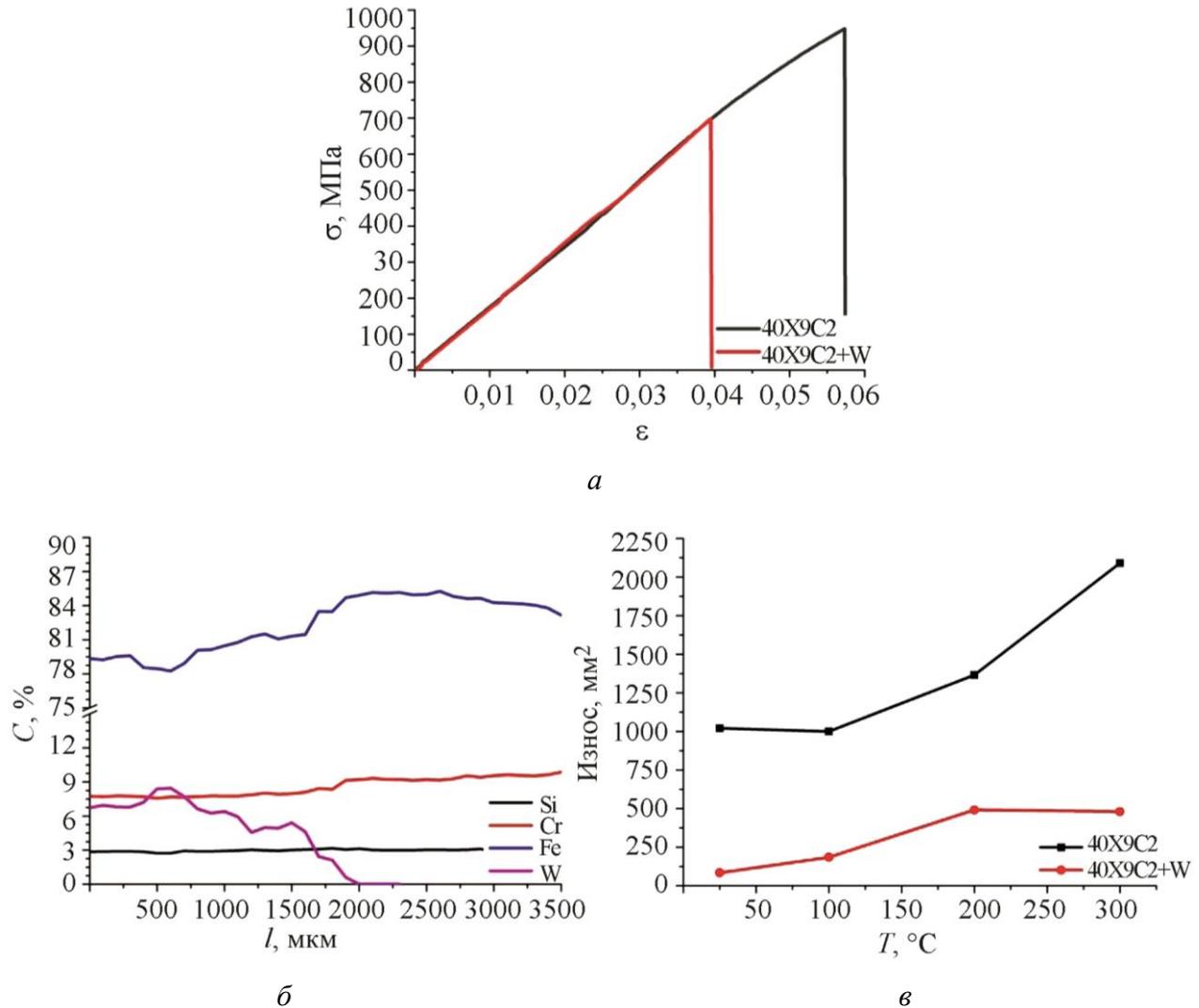


Рис. 5. Диаграммы испытания на растяжение (а), графики изменения химического состава поверхностного слоя вдоль линии, приведенной на рис. 2 а (б), и изменения величины износа в материале образцов композиционного материала при введении порошковых частиц вольфрама в поверхностный слой и основного металла при трении в условиях различной температуры (в)

Структурные изменения в поверхностном слое влияют на механические и трибологические свойства образцов как положительно, так и отрицательно. Испытания на растяжение образцов вдоль нанесения слоев показывают, что среднее значение временного сопротивления снижаются с 935 МПа в основном объеме образца до 602 МПа в поверхностном слое. Такой эффект связан с образованием неоднородностей в распределении вольфрама в объеме образца, что приводит к разрушению композитных слоев практически без пластической деформации (рис. 5 а). Снижение прочности более чем в 1,5 раза происходит одновременно с увеличением твердости поверхностных слоев (рис. 5, б), что положительно влияет на трибологические свойства материала (рис. 5 в).

Проведенные испытания на возвратно-поступательное трение показывают, что величина износа материала снижается с  $1020 \text{ мкм}^2$  для основного металла до  $84 \text{ мкм}^2$  в поверхностном слое при трении в условиях комнатной температуры (рис. 5, в).

При увеличении температуры испытания до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  величина износа образцов увеличивается незначительно в обоих случаях. Повышение температуры до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к равномерному увеличению величины износа для образцов основного металла и поверхностного слоя. Дальнейшее увеличение температуры испытания приводит к резкому увеличению износа образцов основного металла, но не приводит к его увеличению для материала поверхностного слоя (рис. 5 б). Таким образом, при достижении температуры испытания  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  величина износа композита стабилизируется, а материал основного металла все больше снижает износостойкость. По этой причине снижение прочности поверхностных слоев является приемлемым, так как основной объем материала образца при этом не разупрочняется, а поверхность образца приобретает многократно большую износостойкость при комнатной температуре (12,1 раза) и при повышенной до  $100$  ( $5,4$  раза),  $200$  ( $2,8$  раза) и  $300$  ( $4,3$  раза) градусов.

#### 4. Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что введение вольфрама при печати образцов композитов на основе стали, получаемых методом аддитивной электронно-лучевой проволоочной технологии, перспективно для изготовления деталей с сохранением прочности и пластичности основного объема и увеличением износостойкости поверхностного слоя. Модификация структуры вольфрамом приводит к образованию хотя и типичной структуры для аддитивно-полученных образцов в виде вытянутых в направлении отвода тепла дендритов, но с достаточно неоднородным распределением упрочняющих частиц внутри осей дендритов и по их границам. Вольфрам в основном присутствует в виде частиц внутри осей дендритов, по краям осей в виде тонких прослоек, формирует мелкодисперсные частицы в междендритных областях и образует области с повышенным содержанием вольфрама, хрома и кремния без образования частиц в осях дендритов. Содержание вольфрама плавно убывает от поверхностного слоя – к внутреннему объему образца, благодаря чему не образуется трещин или отслоений при остывании материала. Механические свойства образцов

в поверхностных слоях снижаются, но износостойкость их значительно повышается в  $2,8$ – $12,1$  раза по сравнению с основным металлом при различных температурах испытания.

#### Благодарность

*Исследования проводились с использованием Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «NANOTECH».*

*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-2022-0004.*

#### Литература

1. 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. Zykhova, 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)
2. 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.
  3. 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.
  4. Evolution of microstructure and properties of Fe-Cu, manufactured by electron beam additive manufacturing with subsequent friction stir processing / A. Zykova, A. Chumaevskii, A. Vorontsov, K. Kalashnikov, D. Gurianov, A. Gusarova, E. Kolubaev // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 307. – P. 131023. – DOI: 10.1016/j.matlet. 2021.131023.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Manufacturing of Cu-Ni and Fe-Cu-Ni polymetallic materials by the electron-beam additive technology / A. O. Panfilov, E. O. Knyazhev, T. A. Kalashnikova, K. N. Kalashnikov, A. V. Chumaevskii, and S. Yu. Nikonov // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2310. – P. 020242. – DOI: 10.1063/5.0034751.
  8. 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.
  9. 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, pp. 1–11. DOI: 10.1134/S1029959922010015.
  10. 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. – 859. – P. 157824. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157824.