

### РАЗДЕЛ 3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 536.425:539.25

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Al–Co–Cr–Fe–Ni, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Кирилл Александрович Осинцев<sup>1</sup>, Виктор Евгеньевич Громов<sup>2</sup>,  
Сергей Валерьевич Коновалов<sup>3</sup>, Ирина Алексеевна Панченко<sup>4</sup>,  
Екатерина Степановна Ващук<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>1,2,3,4</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>1</sup> kirillov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>

<sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>4</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-2836>

<sup>5</sup> Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, Прокопьевск, Россия, [vaschuk@bk.ru](mailto:vaschuk@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

**Аннотация.** Приведено описание методики формирования высокоэнтропийного сплава состава Al–Co–Cr–Fe–Ni с использованием проволочно-дугового аддитивного производства. Представлены режимы и параметры работы наплавочного комплекса, траектории нанесения слоёв на подложку из стали Ст20. Полученный сплав имеет следующий элементный состав (масс %): 15,64 Al; 7,78 Co; 8,87 Cr; 22,31 Fe; 44,57 Ni с примесями 0,53 Si; 0,18 Cu; 0,098 Ti. Методами современного физического материаловедения показано, что размеры дендритов полученного ВЭС изменяются в пределах 40–80 мкм. Вдоль границ дендритных зерен и в объёме выявлены включения второй фазы. Методами картирования установлено, что границы зерен обогащены атомами хрома и железа, объем зерен обогащен атомами никеля и алюминия, а кобальт распределен в сплаве однородно. С помощью качественного анализа дифрактограмм определен фазовый состав сплава – AlNi и Al<sub>2</sub>FeCo.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав Al–Co–Cr–Fe–Ni, проволочно-дуговое аддитивное производство, структура, фазовый состав.

**Для цитирования:** Структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава Al–Co–Cr–Fe–Ni, полученного проволочно-дуговой аддитивной технологией / К.А. Осинцев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов и др. // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 141–146. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020.

Original article

## STRUCTURAL-PHASE STATE OF HIGH-ENTROPY Al–Co–Cr–Fe–Ni ALLOY OBTAINED BY WIRE-ARC ADDITIVE TECHNOLOGY

Kirill A. Osintsev<sup>1</sup>, Victor E. Gromov<sup>2</sup>, Sergey V. Konovalov<sup>3</sup>,  
Irina A. Panchenko<sup>4</sup>, Ekaterina S. Vashchuk<sup>5</sup>

<sup>1,3</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>1,2,4</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

<sup>1</sup> kirilloss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>

<sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup> ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>4</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3656-2836>

<sup>5</sup> Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Prokopyevsk, Russia  
vashchuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

**Abstract.** A description of the method of forming a high-entropy alloy of the composition Al–Co–Cr–Fe–Ni using wire-arc additive production is given. The modes and operating parameters of the surfacing complex, the trajectory of the deposition of layers on the substrate made of St20 steel are presented. The resulting alloy has the following elemental composition (wt %): 15,64 Al; 7,78 Co; 8,87 Cr; 22,31 Fe; 44,57 Ni with 0,53 Si impurities; 0,18 Cu; 0,098 Ti. It has been shown by the methods of modern physical materials science that the sizes of dendrites of the obtained HEA vary within 40–80 microns. Inclusions of the second phase were revealed along the boundaries of dendritic grains and in the volume. It has been established by mapping methods that the grain boundaries are enriched with chromium and iron atoms, the grain volume is enriched with nickel and aluminum atoms, and cobalt is uniformly distributed in the alloy. The phase composition of the alloy, AlNi and Al<sub>2</sub>FeCo, was determined using a qualitative analysis of diffraction patterns.

**Keywords:** high-entropy alloy Al–Co–Cr–Fe–Ni, wire-arc additive manufacturing, structure, phase composition.

**For citation:** Osintsev, K.A., Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Panchenko, I.A. & Vashchuk, E.S. (2021). Structural-phase state of high-entropy Al–Co–Cr–Fe–Ni alloy obtained by wire-arc additive technology. *Polzunovskiy vestnik*, 1,141-146. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.020

В последние годы внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к созданию и исследованию высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС), обладающих уникальными свойствами [1, 2]. ВЭС образуют, как правило, путем смешивания пяти и более элементов с атомным соотношением каждого элемента 5–35 ат. % [3]. Варьированием состава ВЭС можно добиться высокой прочности [4, 5], твердости [6, 7], коррозионной стойкости [8, 9], износостойкости [10, 11], отличных механических свойств при высокой и низкой температурах [12–14]. Наиболее распространенным способом получения ВЭС в настоящее время является процесс вакуумно-дуговой наплавки, недостаток которого заключается в ограничении при производстве деталей сложной формы и больших размеров. Сравнительный анализ методов получения ВЭС с выявленными преимуще-

ствами и недостатками проведен в монографии [1]. В последнее десятилетие всё больше внимания уделяется технологиям аддитивного производства. Это обусловлено тем, что такие технологии позволяют получать изделия со сложной геометрией путем их послойного формирования, а не методами «вычитания», такими как механическая обработка, которые обычно используются при изготовлении изделий традиционными технологиями плавки.

Аддитивные технологии могут быть разделены по типу источника энергии, который используется для расплавления исходного материала: лазерная энергия, энергия пучка электронов, энергия электрической дуги и энергия плазмы. На рисунке 1 представлены статистические данные о частоте использования различных видов аддитивных технологий для изготовления высокоэнтропийных

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Al–Co–Cr–Fe–Ni, ПОЛУЧЕННОГО ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

сплавов. Как видно из рисунка, наибольшее распространение получил метод селективного лазерного плавления. Далее идут плазменная дуговая наплавка и прямое осаждение металла. И совсем новым направлением с небольшим количеством опубликованных работ является проволочно-дуговое аддитивное производство.

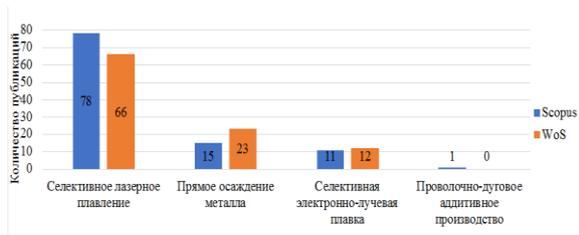


Рисунок 1 – Гистограмма распределения количества работ, в зависимости от технологий аддитивного производства, применяемых для получения высокоэнтروпийных сплавов [1]

Figure 1 – Histogram of the distribution of the number of works, depending on the technologies of additive manufacturing, used to obtain High entropy alloys [1]

По сравнению с технологиями селективного лазерного плавления, прямого осаждения металла или селективной электронно-лучевой плавки, технология проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM – wirearcadditivemanufacturing) использует металлическую проволоку в качестве исходного материала. Благодаря этому данный метод имеет высокую скорость осаждения (до 30 кг/ч), высокую степень использования материала, и обладает возможностью создания деталей больших размеров [15–17]. К недостаткам следует отнести точность разрешения 5–8 мм.

Целью настоящей работы является разработка технологии проволочно-дугового аддитивного производства для получения высокоэнтропийного сплава системы Al–Co–Cr–Fe–Ni и исследование его структурно-фазового состояния.

Для формирования объемных образцов (рисунок 2, а) высокоэнтропийного сплава системы Al–Co–Cr–Fe–Ni в качестве исходного материала была использована многокомпонентная проволока, состоящая из трех жил различного элементного состава: алюминиевая проволока (Al ≈ 99,95 %, диаметр 0,5 мм), хромоникелевая проволока X20H80 (Cr ≈ 20 %, Ni ≈ 80 %, диаметр 0,4 мм), а также проволока из прецизионного сплава 29НХ (Co ≈ 17 %, Fe ≈ 54%, Ni ≈ 29 %, диаметр 0,4 мм). Много-

компонентная проволока была получена путем автоматизированного скручивания данных трех жил (рисунок 2, б) на оригинальной авторской установке. Выбор проволок данных марок и их диаметра был обусловлен тем, что они обеспечивали получение высокоэнтропийного сплава предварительно рассчитанного состава.

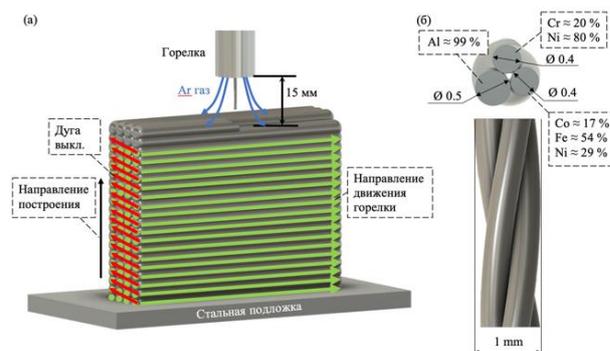


Рисунок 2 – (а) Схема проволочно-дугового аддитивного производства с использованием проволоки, состоящего из 3 жил; (б) 3D-модель использованного провода [1]

Figure 2 – (a) Schematic of wire-arc additive manufacturing using wire consisted of 3 cores; (b) 3D-model of the used wire [1]

Для подбора оптимального режима скручивания, обеспечивающего успешное (без застревания и разрывов) прохождение проволоки через направляющий канал и сопло горелки, варьировались частота вращения принимающей и подающих катушек. Диаметр комбинированной проволоки, полученной данным методом, составил ≈ 1 мм.

Изготовление образцов ВЭС осуществлялось послойным нанесением на подложку из стали с помощью технологии проволочно-дугового аддитивного производства в атмосфере инертного газа (Ar ≈ 99,99 %) (рисунок 2, а). Параметры работы наплавочного комплекса были следующими: скорость подачи проволоки – 8 м/мин, напряжение – 17 В, скорость движения горелки – 0,3 м/мин, скорость подачи газа (Ar) – 14 л/мин.

При формировании образцов ВЭС были использованы 3 подхода: 1) нанесение всех слоев металла «слева – направо», температура подложки – 25 °С; 2) нанесение всех слоев металла «слева – направо», температура подложки – 250 °С; 3) нанесение слоев металла «слева – направо, затем справа – налево» и наоборот, температура подложки – 250 °С (рисунок 3).

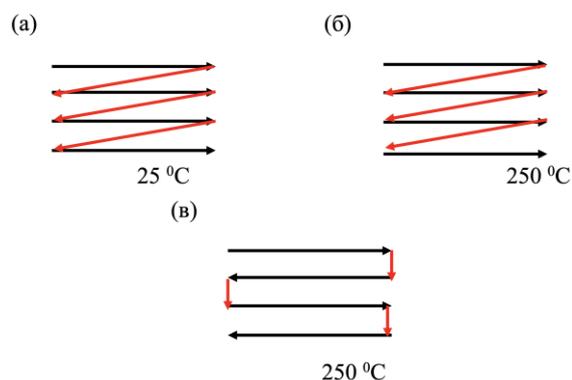


Рисунок 3 – (а) Траектория наплавления слоев образцов по режиму 1, (б) Траектория наплавления слоев образцов по режиму 2, (в) Траектория наплавления слоев образцов по режиму 3. Черными стрелками указано направление движения горелки с включенной дугой, красными – с выключенной

Figure 3 – (a) Trajectory of deposition layers of samples according to mode 1, (b) Trajectory of deposition of sample layers according to mode 2, (c) Trajectory of deposition of sample layers according to mode 3. Black arrows indicate the direction of movement of the torch with the arc on, red – off

Полученные заготовки высокоэнтропийного сплава имели размеры около 60 x 140 x 20 мм и представляли собой параллелепипеды, состоящие из 20 наплавленных слоев в высоту и 4 слоев в толщину. Рентгенофлуоресцентный анализ, проведенный на спектрометре Shimadzu XRF-1800, показал, что полученный сплав имеет следующий элементный состав (масс. %): 15,64 Al, 7,78 Co, 8,87 Cr, 22,31 Fe, 44,57 Ni. Также в составе сплава присутствуют атомы примесных элементов (масс. %) 0,53 Si, 0,18 Cu, 0,098 Ti, входящие в состав исходных проволок.

Структурно-фазовое состояние сплава анализировали методами сканирующей (микроскопы «LeO Evo 50», Carl Zeiss) и просвечивающей (прибор JEM 2010 Jeol) электронной дифракционной микроскопии и рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000).

Характерное изображение структуры образцов ВЭС, полученное методами сканирующей электронной микроскопии, приведено на рисунке 4. Травление поверхности образцов ВЭС приводит к выявлению дендритной структуры (рисунок 4, а). Размеры дендритов

изменяются в пределах от 40 мкм до 80 мкм. Вдоль границ и в объеме дендритов выявляются включения второй фазы (рисунок 4, б, включения указаны стрелками). Методами картирования удалось установить, что эта фаза обогащена атомами Fe и Cr, объем зерен обогащен атомами никеля и алюминия, а кобальт распределен в сплаве однородно. Качественный анализ дифрактограмм выявил присутствие следующих фаз: AlNi и Al<sub>2</sub>FeCo.

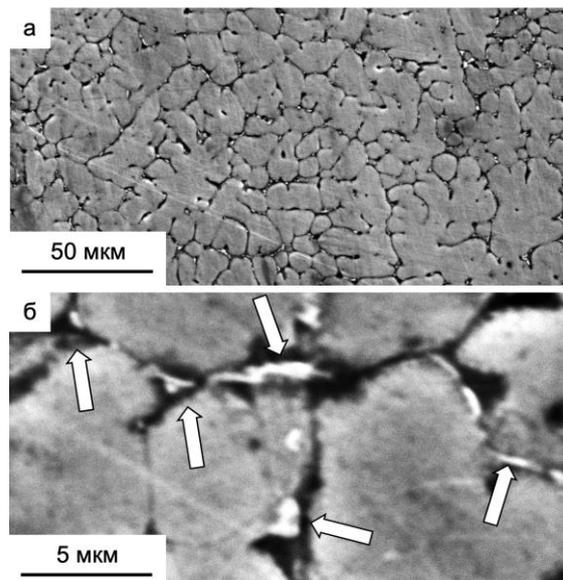


Рисунок 4 – Микроструктура ВЭС. Стрелками на (б) указаны включения второй фазы. Сканирующая электронная микроскопия

Figure 4 – Microstructure of WPP. Arrows in (b) indicate the inclusions of the second phase. Scanning electron microscopy

Таким образом, с помощью технологии проволочно-дугового аддитивного производства изготовлены образцы ВЭС состава Al–Co–Cr–Fe–Ni. В качестве исходного материала была использована многокомпонентная проволока, состоящая из трех жил различного элементного состава. Полученный сплав имеет следующий элементный состав (масс. %): 15,64 Al, 7,78 Co, 8,87 Cr, 22,31 Fe, 44,57 Ni. Методами сканирующей электронной микроскопии поперечного травленного шлифа установлено, что размеры дендритов сплава изменяются в пределах от 40 мкм до 80 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 20-19-00452).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. и др. Высокоэнтропийные сплавы. – Новокузнецк : Полиграфист, 2021. – 178 с.

2. George E.P., Curtin W.A., Tagan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Mater.* – 2020. – Vol. 188. – P. 435–474.

3. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Mater.* – 2016. – Vol. 118. – P. 152–163.

4. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi<sub>x</sub> with excellent room-temperature mechanical properties // *Appl. Phys. Lett.* – 2007 – Vol. 90. – 181904.

5. Wang X.F., Zhang Y., Qiao Y., Chen G.L. Novel microstructure and properties of multicomponent cocrcufenitix alloys // *Intermetallics.* – 2007. – Vol. 15. – P. 357–362.

6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Prog. Mater. Sci.* – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93.

7. Wang W.R., Wang W.L., Wang S.C., Tsai Y.C., Lai C.H., Yeh J.W. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high-entropy alloys. – *Intermetallics.* – 2012. – Vol. 26. – P. 44–51.

8. Kao Y.F., Lee T.D., Chen S.K., Chang Y.S. Electrochemical passive properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi (x = 0, 0.25, 0.50, 1.00) alloys in sulfuric acids // *Corros. Sci.* – 2010. – Vol. 52. – P. 1026–1034.

9. Ye Q.F., Feng K., Li Z.G., Lu F.G., Li R.F., Huang J., Wu Y.X. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – Vol. 396. – p. 1420–1426.

10. Wu J.M., Lin S.J., Yeh J.W., Chen S.K., Huang Y.S., Chen H.C. Adhesive wear behavior of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi high-entropy alloys as a function of aluminum content // *Wear.* – 2006. – Vol. 261. – P. 513–519.

11. Chuang M.H., Tsai M.H., Wang W.R., Lin S.J., Yeh J.W. Microstructure and wear behavior of Al<sub>x</sub>Co1.5CrFeNi1.5Ti<sub>y</sub> high-entropy alloys // *Acta Mater.* – 2011. – Vol. 59. – P. 6308–6317.

12. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb<sub>25</sub>Mo<sub>25</sub>Ta<sub>25</sub>W<sub>25</sub> and V<sub>20</sub>Nb<sub>20</sub>Mo<sub>20</sub>Ta<sub>20</sub>W<sub>20</sub> refractory high entropy alloys // *Intermetallics.* – 2011. – Vol. 19. – P. 698–706.

13. Qiao J.W., Ma S.G., Huang E.W., Chuang C.P., Liaw P.K., Zhang Y. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures. – *Mater. Sci. Forum.* – 2011. – Vol. 688. – P. 419–425.

14. Laktionova M.A., Tabchnikova E.D., Tang Z., Liaw P.K. Mechanical properties of the high-entropy alloy Ag<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi at temperatures of 4.2–300 K // *Low Temp. Phys.* – 2013. – Vol. 39. – P. 630–632.15.

Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc. Additive

Manufacturing // *Mater.Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 32. – P. 641–647.

16. Ding D.H., Pan Z.X., Cuiuri D., Li H.J., J. Int. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *Adv. Manuf. Tech.* – 2015. – Vol. 81. – P. 465–481.

17. Chen X.Z., Su C.C., Wang Y.F., Sidiquee A.N., Sergey K., Jayalakshmi S., Singh R.A., Surf J. Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) // *Invest. X-Ray.* – 2018. – Vol. 12. – P. 1278–1284.

### Информация об авторах

К. А. Осинцев – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; инженер Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; научный сотрудник Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Менеджмент качества и инноваций» Сибирского государственного индустриального университета.

Е. С. Ващук – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Кузбасского государственного технического университета им Т.Ф. Горбачева.

### REFERENCES

1. Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Ivanov, YU.F. & other authors. (2021). *Vysokoentropijnnye splavy*. Novokuzneck : Poligrafist. (In Russ.).

2. George, E.P., Curtin, W.A. & Tagan, C.C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Mater.* (188), 435–474.

3. Laplanche, G., Kostka, A., Horst, O.M., Eggeler, G. & George, E.P. (2016). Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Mater.* (118), 152–163.

4. Zhou, Y.J., Zhang, Y., Wang, Y.L. & Chen, G.L. (2007). Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi with excellent room-temperature mechanical properties. *Appl. Phys. Lett.*, (90), 181904.
5. Wang, X.F., Zhang, Y., Qiao, Y. & Chen, G.L. (2007). Novel microstructure and properties of multicomponent cocrucfenitix alloys. *Intermetallics*, (15), 357–362.
6. Zhang, Y., Zuo, T.T., Tang, Z., Gao, M.C., Dahmen, K.A., Liaw, P.K. & Lu, Z.P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Prog. Mater. Sci.*, (61), 1–93.
7. Wang, W.R., Wang, W.L., Wang, S.C., Tsai, Y.C., Lai, C.H. & Yeh, J.W. (2012). Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of AlxCoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*, (26), 44–51.
8. Kao, Y.F., Lee, T.D., Chen, S.K. & Chang, Y.S. (2010). Electrochemical passive properties of AlxCoCrFeNi (x = 0, 0.25, 0.50, 1.00) alloys in sulfuric acids. *Corros. Sci.*, (52), 1026–1034.
9. Ye, Q.F., Feng, K., Li, Z.G., Lu, F.G., Li, R.F., Huang, J. & Wu, Y.X. (2017). Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating. *Appl. Surf. Sci.*, (396), 1420–1426.
10. Wu, J.M., Lin, S.J., Yeh, J.W., Chen, S.K., Huang, Y.S. & Chen, H.C. (2006). Adhesive wear behavior of AlxCoCrCuFeNi high-entropy alloys as a function of aluminum content. *Wear*, (261), 513–519.
11. Chuang, M.H., Tsai, M.H., Wang, W.R., Lin, S.J. & Yeh, J.W. (2011). Microstructure and wear behavior of AlxCo1.5CrFeNi1.5Ti high-entropy alloys. *Acta Mater.*, (59), 6308–6317.
12. Senkov, O.N., Wilks, G.B., Scott, J.M. & Miracle, D.B. (2011). Mechanical properties of Nb25Mo25Ta25W25 and V20Nb20Mo20Ta20W20 refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, (19), 698–706.
13. Qiao, J.W., Ma, S.G., Huan, E.W., Chuang, C.P., Liaw, P.K. & Zhang, Y. (2011). Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures. *Mater. Sci. Forum*, (688), 419–425.
14. Laktionova, M.A., Tabchnikova, E.D., Tang, Z. & Liaw, P.K. (2013). Mechanical properties of the high-entropy alloy Ag0.5CoCrCuFeNi at temperatures of 4.2–300 K. *Low Temp. Phys.*, (39), 630–632.
15. Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G. & Colegrove, P. (2016). Wire + Arc Additive Manufacturing. *Mater. Sci. Technol.*, (32), 641–647.
16. Ding, D.H., Pan, Z.X., Cuiuri, D., Li, H.J. & J. Int. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Adv. Manuf. Tech.*, (81), 465–481.
17. Chen, X.Z., Su, C.C., Wang, Y.F., Sid-diquee, A.N., Sergey, K., Jayalakshmi, S., Singh, R.A. & Surf, J. (2018). Cold Metal Transfer (CMT) Based Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM). *Invest. X-Ray*, (12), 1278–1284.

#### Information about the authors

K. A. Osintsev – postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University; Engineer at the Siberian State Industrial University.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Science Disciplines named after Professor V.M. Finkel of the Siberian State Industrial University.

S. V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University; Researcher at the Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality and Innovation Management of the Siberian State Industrial University.

E. S. Vashchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev.

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

Статья поступила в редакцию 26.01.2021; одобрена после рецензирования 22.02.2021; принята к публикации 01.03.2021.

The article was received by the editorial board on 26 Jan 21; approved after reviewing on 22 Feb 21; accepted for publication on 01 Mar 21.