

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>



А.М. Грачева, И.А. Полозов , А.Н. Борисов,
В.Ш. Суфияров, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 igor.polozov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ДОБАВЛЕНИЕМ МЕДИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО С ПОСЛЕДУЮЩИМ СПЕКАНИЕМ

Аннотация. В данной статье рассматриваются интерметаллидные титановые сплавы на базе TiAl, изготовленные с использованием аддитивной технологии струйного нанесения связующего с добавлением меди. Порошок сплава на основе TiAl был смешан с порошком меди в различных концентрациях (0, 2, 4 и 6 вес.%). Из порошковой смеси методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием были изготовлены образцы. Добавление меди значительно улучшило плотность образцов после спекания (с 3,65 г/см³ для образцов TiAl без добавления меди до 3,99 г/см³ для образцов TiAl с 2% меди). Металлографический анализ показал снижение пористости с 23% до 2,5% при добавлении 2% меди. Проведен анализ микротвердости образцов и механических свойств на растяжение.

Ключевые слова: струйное нанесение связующего, аддитивное производство, интерметаллидный сплав, алюминид титана.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30004 «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств», <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Для цитирования:

Грачева А.М., Полозов И.А., Борисов А.Н., и др. Исследование интерметаллидного титанового сплава с добавлением меди, изготовленного методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

A.M. Gracheva, I.A. Polozov  , A.N. Borisov,
V.S. Sufiiarov, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

 igor.polozov@gmail.com

INVESTIGATION OF INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY WITH COPPER ADDITION MADE BY BINDER JETTING WITH SUBSEQUENT SINTERING

Abstract. This article examines intermetallic titanium alloys based on TiAl, fabricated using binder jetting additive manufacturing technology with the addition of copper. TiAl-based alloy powder was mixed with copper powder in various concentrations (0, 2, 4, and 6 wt.%). Samples were fabricated from the powder mixture using binder jetting followed by sintering. The addition of copper significantly improved the density of the sintered samples (from 3.65 g/cm³ for TiAl samples without copper addition to 3.99 g/cm³ for TiAl samples with 2% copper). Metallographic analysis showed a reduction in porosity from 23% to 2.5% with the addition of 2% copper. An analysis of the microhardness of the samples and their tensile properties was also conducted.

Keywords: binder jetting, additive manufacturing, intermetallic alloy, titanium aluminide.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004>.

Citation:

A.M. Gracheva, I.A. Polozov, A.N. Borisov, et al., Investigation of intermetallic titanium alloy with copper addition made by binder jetting with subsequent sintering, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 96–105, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30206>

Введение. Интерметаллидные сплавы на основе алюминиды титана (TiAl) привлекли значительный интерес в различных отраслях благодаря их механическим свойствам, низкой плотности и хорошей стойкости к окислению [1, 2]. Аддитивные технологии (АТ) предлагают новые возможности для производства изделий сложной формы из сплавов на основе TiAl [3]. Метод струйного нанесения связующего, относящийся к АТ, зарекомендовал себя как перспективная технология для изготовления металлических изделий [4–6]. Данный метод позволяет изготавливать детали практически конечной формы с минимальными отходами материала, более короткими производственными циклами и более низкими затратами по сравнению с традиционными методами производства.

Несмотря на имеющиеся преимущества метода струйного нанесения связующего, другие методы аддитивного производства, такие как селективное лазерное плавление (СЛП) и селективное электронно-лучевое плавление (СЭЛП), на данный момент уже используются применительно к сплавам на базе TiAl [7, 8]. Однако процессы СЛП и СЭЛП для интерметаллидных сплавов сталкиваются с определенными проблемами, включая образование дефектов, таких как трещины. Кроме того, высокая температура плавления и низкая теплопроводность TiAl-сплавов делают их подверженными тепловым градиентам и остаточным термическим напряжениям в процессе охлаждения [9]. В связи с этим для получения изделий из интерметаллидных сплавов методами

СЛП и СЭЛП требуется дорогостоящее оборудование, обладающее рядом функций, которые отсутствуют в наиболее распространенном коммерчески доступном оборудовании, работающем по данным технологиям. Технология струйного нанесения связующего основана на послойном нанесении связующего вещества на порошковый материал, формирующем изделие слой за слоем. Специальная печатающая головка распыляет связующее на тонкий слой порошка, склеивая частицы, после чего наносятся последующие слои до получения готовой модели. Эта технология экономически выгоднее по сравнению с СЛП и СЭЛП благодаря более низкой стоимости оборудования и энергоэффективности. Струйное нанесение связующего также обеспечивает более высокую производительность и требует менее сложной постобработки, что дополнительно снижает общие производственные расходы.

Известно, что сплавы на основе TiAl сложно уплотнить из порошков методом спекания без давления [10], что важно для сохранения сложной формы детали при использовании технологии струйного нанесения связующего. Основной причиной плохой способности к спеканию этих сплавов является их низкий коэффициент самодиффузии [11].

Для преодоления этих проблем исследуются альтернативные подходы, включая добавление легирующих элементов для улучшения способности к спеканию TiAl-сплавов [12]. Медь (Cu) показала себя перспективной добавкой для улучшения процесса спекания порошков сплавов на основе TiAl. Сообщается, что добавление порошка меди к порошкам сплава TiAl способствует образованию смачивающей жидкой фазы во время спекания, что улучшает перераспределение частиц и усиливает связь между частицами TiAl [10].

Целью данной работы является исследование влияния меди на процесс спекания заготовок образцов, изготовленных из порошков TiAl-сплава методом струйного нанесения связующего, микроструктуру и механические свойства образцов.

Методы и материалы

Порошок сплава на основе TiAl марки ВИТ7Л (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Россия) с номинальным составом Ti-48Al-2Cr-2Nb-1.5V-0.1Gd (ат.%), сферической формой частиц и средним размером частиц 39 мкм использовался в качестве основного материала (рис. 1а). Порошок меди марки ПМС-1 (чистота 99,5%) со средним размером частиц 37 мкм и дендритной формой частиц использовался в качестве добавки (рис. 1б). Порошок сплава TiAl и порошок меди были смешаны в гравитационном смесителе в течение 12 часов для получения однородной смеси. Были подготовлены смеси порошков с различным содержанием меди: TiAl-0Cu, TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu, соответствующие 0, 2, 4 и 6 вес.% меди.

С добавлением подготовленных порошковых смесей методом струйного нанесения связующего с использованием установки ExOne Innovent были изготовлены образцы размером 10 × 10 × 10 мм. В качестве связующего материала при 3D-печати образцов применялось органическое связующее производства компании ExOne (США). При 3D-печати использовались следующие параметры процесса: толщина слоя – 100 мкм, насыщение связующим – 60%, скорость движения устройства для нанесения порошка – 20 мм/с, скорость вращения ролика для выравнивания слоя – 250 об/мин, целевая температура подложки – 50°C. После процесса печати образцы помещались в термическую печь в воздушной атмосфере для отверждения связующего при 180°C в течение 4 часов. Затем образцы очищались от порошка и спекались в вакуумной печи Carbolite Gero (Германия) при 1375°C согласно профилю спекания, показанному на рис. 1д. Температура спекания, использованная в данной работе, была выбрана на основе результатов исследования [10].

Микроструктура образцов после спекания исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Mira 3 в режиме обратно отраженных электронов. Измерения плотности проводились путем гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 20018-74. Относительная плотность образцов после спекания также оценивалась металлографическим методом путем

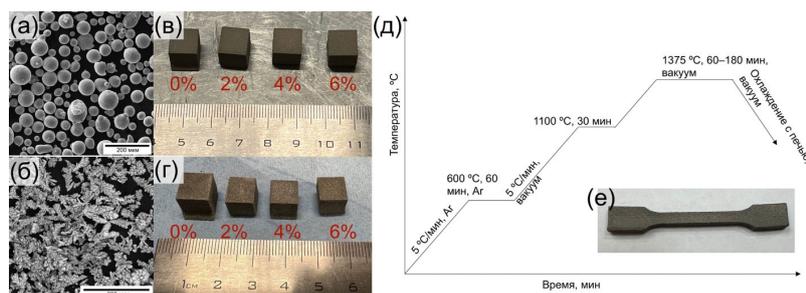


Рис. 1. (а) Порошок TiAl-сплава, (б) порошок меди, фотографии изготовленных образцов (в) до и (г) после спекания, (д) профиль спекания, (е) фото образца для испытаний на растяжение

Fig. 1. (a) TiAl alloy powder, (b) copper powder, photos of fabricated specimens (c) before and (d) after sintering, (e) sintering profile, (f) photo of tensile test specimen

анализа изображений полированных микрошлифов образцов, полученных на оптическом микроскопе с использованием программного обеспечения для анализа изображений ImageJ [13–15]. Образцы для металлографического исследования разрезались вдоль направления выращивания. Измерение микротвердости проводилось с использованием твердомера Buehler VH1150 с индентором Виккерса при нагрузке 500 г и времени выдержки 10 с. Размеры образцов измерялись с помощью цифрового штангенциркуля. Испытания на растяжение проводились на испытательной машине Zwick/Roell Z100 с использованием плоских образцов (рис. 1e) с длиной рабочей части 30 мм и толщиной 4 мм.

Результаты и их обсуждение

Микроструктурный анализ образцов после спекания выявил явные различия в зависимости от содержания меди. Оптические изображения отполированных поперечных сечений показали, что образец TiAl-0Cu продемонстрировал плохое уплотнение в результате спекания, характеризующееся крупными порами и слоистой пористой структурой. Напротив, добавление меди привело к значительному увеличению плотности материала, что наблюдалось в образцах TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu (рис. 2).

Измерение плотности образцов показало, что с добавлением меди плотность материала после спекания значительно повысилась за счет снижения пористости. Плотность увеличилась с 3,65 г/см³ для образцов TiAl-0Cu до 3,99 г/см³ для образцов TiAl-2Cu. Металлографический анализ показал снижение пористости с 23% до 2,5% при добавлении 2% Cu. Однако дальнейшее добавление меди не привело к заметному изменению плотности или пористости. Повышение плотности после спекания для образцов с добавлением меди также привело к большей усадке образцов, как показано на рис. 2e, достигающей 18% для образца TiAl-6Cu. Полученные значения усадки типичны для методов аддитивного производства на основе спекания и соответствуют значениям, полученным для сплавов на основе металлов после спекания для уплотнения методом струйной печати связующего вещества [16, 17].

Материал образцов после спекания состоял из duplexной микроструктуры, состоящей из равноосных фаз γ -TiAl и пластинчатых фаз γ -TiAl/ α 2-Ti3Al. Увеличение содержания меди привело к образованию фаз, обогащенных медью, как показано на рис. 3.

Повышение плотности и снижение пористости можно объяснить образованием смачивающей бинарной жидкой фазы Ti-Al, вызванной добавлением меди. Эта жидкая фаза образуется в широком диапазоне температур и обладает хорошей смачиваемостью твердых частиц TiAl. Она эффективно заполняет пустоты и способствует перераспределению частиц, улучшая связь между частицами TiAl и снижая общую пористость спеканных образцов.

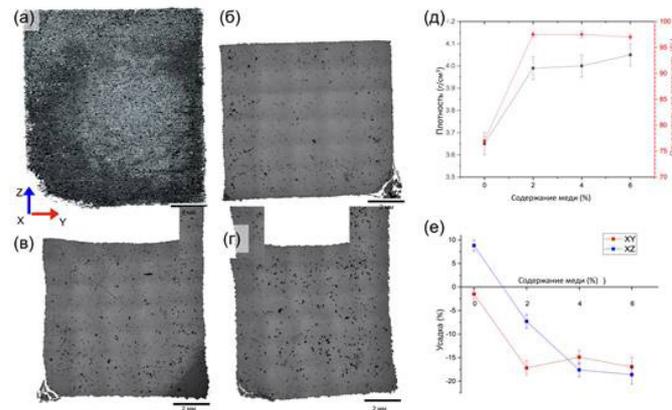


Рис. 2. Изображения микрошлифов спеченных образцов TiAl с содержанием Cu (а) 0, (б) 2, (в) 4, (г) 6 вес.%, (д) изменение плотности и (е) размеров образцов после спекания
 Fig. 2. Micrographs of sintered TiAl samples with (a) 0, (b) 2, (c) 4, (d) 6 wt.% Cu content, (e) density change and (f) shrinkage values of the samples after sintering

Измерения микротвердости показали увеличение микротвердости с повышением содержания меди (табл. 1). Микротвердость образца TiAl-0Cu не измерялась из-за его низкой прочности. Образцы TiAl-2Cu, TiAl-4Cu и TiAl-6Cu продемонстрировали значения микротвердости 326 ± 28 HV, 342 ± 39 HV и 379 ± 33 HV соответственно. Образование дополнительных фаз, богатых медью, способствует упрочнению интерметаллидного сплава на основе TiAl. Прочность на разрыв достигла 243 ± 15 МПа для образца TiAl-4Cu, тогда как относительное удлинение при разрыве составило 0,2%. Увеличение содержания меди с 2 до 4% незначительно повысило прочность на разрыв, тогда как дальнейшее увеличение содержания меди до 6% не привело к значительным изменениям. Низкое удлинение типично для сплавов на основе TiAl из-за их хрупкости [18], однако полученные значения прочности на разрыв были ниже по сравнению с традиционно полученными интерметаллидными сплавами TiAl. Это может быть связано с наличием остаточной пористости и высокой чувствительностью сплавов TiAl к поверхностным дефектам из-за низкой вязкости [19]. Последующее горячее изостатическое прессование потенциально может устранить остаточную пористость и улучшить механические свойства сплава.

Таблица 1
Микротвердость и механические свойства спеченных образцов на растяжение
 Table 1
Microhardness and tensile mechanical properties of sintered specimens

Образец	TiAl-2Cu	TiAl-4Cu	TiAl-6Cu
Микротвердость, HV0,5	326 ± 28	342 ± 39	379 ± 33
Предел прочности, МПа	222 ± 12	243 ± 15	237 ± 14
Относит. удлинение, %	$0,12 \pm 0,03$	$0,20 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,04$

Полученные в данном исследовании результаты соответствуют предыдущим исследованиям процесса спекания интерметаллидных сплавов на основе TiAl. В работе [10] исследовали процесс спекания образцов из сплава Ti-48Al-2Cr-2Nb с содержанием меди до 2 ат.%, полученных традиционными методами порошковой металлургии. В результате авторами было выявлено образование смачивающей жидкой фазы при спекании образцов. Их результаты показали, что образующаяся

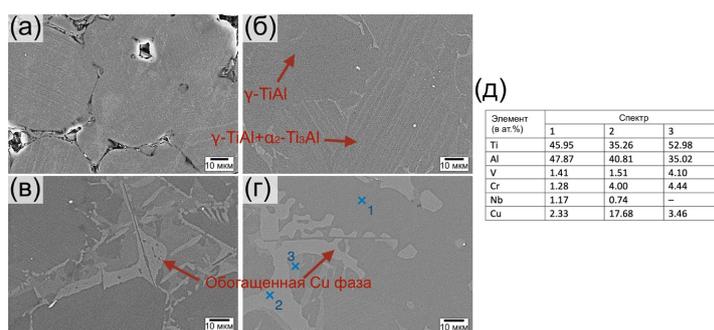


Рис. 3. СЭМ-изображения микроструктуры спеченных образцов TiAl с содержанием Cu (а) 0, (б) 2, (в) 4, (г) 6 вес.%, (д) измерения химического состава, соответствующие точкам, показанным на (г)
 Fig. 3. SEM images of microstructure of sintered TiAl samples with (a) 0, (b) 2, (c) 4, (d) 6 wt.% Cu content, (e) chemical composition measurements corresponding to the points shown in (d)

жидкость в основном является бинарной жидкой фазой Ti-Al, а не фазой, обогащенной медью. Эта жидкая фаза играет решающую роль в улучшении способности к спеканию и уплотнению сплава на основе TiAl.

Повышение способности к спеканию и улучшение механических свойств за счет добавления меди в интерметаллидный сплав на основе TiAl, изготовленный методом струйной печати связующего вещества, открывает новые возможности для производства интерметаллидных компонентов с использованием технологий аддитивного производства.

Выводы

– Данное исследование демонстрирует значительное улучшение способности к спеканию, плотности и увеличение механических свойств интерметаллидного сплава на основе TiAl, изготовленного методом струйного нанесения связующего с последующим спеканием за счет добавления меди. Образование смачивающей бинарной жидкой фазы, вызванной медью, способствует снижению пористости и увеличению микротвердости.

– Спеченные образцы характеризовались duplexной микроструктурой, состоящей из равновесных фаз γ -TiAl и пластинчатых фаз γ -TiAl/ α 2-Ti₃Al. Увеличение содержания меди привело к образованию обогащенных медью фаз.

– Пористость в образцах после спекания снизилась с 23% до 2,5% при добавлении 2% меди к исходному порошку. Микротвердость достигла 379 ± 33 HV при содержании меди 6 вес.%. Прочность на разрыв спеченных образцов достигла 243 ± 15 МПа при содержании меди 4% и относительном удлинении 0,2%.

– Для дальнейшей оценки применимости исследуемого метода в изготовлении изделий из интерметаллидного титанового сплава возможные будущие исследования могут включать изучение влияния горячего изостатического прессования на устранение остаточной пористости и улучшение механических свойств сплава. Также рекомендуется исследовать высокотемпературные свойства полученного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology. Weinheim (Germany): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. 745 S. DOI: 10.1002/9783527636204
 [2] Bewlay B.P., Nag S., Suzuki A., Weimer M.J. TiAl alloys in commercial aircraft engines // Materials at High Temperatures. 2016. Vol. 33. Iss. 4–5. P. 549–559. DOI: 10.1080/09603409.2016.1183068

- [3] **Wimler D., Lindemann J., Reith M., Kirchner A., Allen M., Vargas W.G., Franke M., Klöden B., Weißgärber T., Güther V., Schloffer M., Clemens H., Mayer S.** Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing // *Intermetallics*. 2021. Vol. 131. Art. no. 107109. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107109
- [4] **Dilip J.J.S., Miyanaji H., Lassell A., Starr T.L., Stucker B.** A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing // *Defence Technology*. 2017. Vol. 13. Iss. 2. P. 72–76. DOI: 10.1016/j.dt.2016.08.001
- [5] **Polozov I., Sufiiarov V., Shamshurin A.** Synthesis of titanium orthorhombic alloy using binder jetting additive manufacturing // *Materials Letters*. 2019. Vol. 243. P. 88–91. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.027
- [6] **Li M., Du W., Elwany A., Pei Z., Ma C.** Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 9. Art. no. 090801. DOI: 10.1115/1.4047430
- [7] **Todai M., Nakano T., Liu T., Yasuda H.Y., Hagihara K., Cho K., Ueda M., M. Takeyama M.** Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 13. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.001
- [8] **Scaramuccia M.G., Demir A.G., Caprio L., Tassa O., Previtali B.** Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718 // *Powder Technology*. 2020. Vol. 367. P. 376–389. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.010
- [9] **Polozov I., Gracheva A., Popovich A.** Processing, Microstructure, and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured Ti2AlNb-Based Alloy with Carbon, Boron, and Yttrium Microalloying // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 8. Art. no. 1304. DOI: 10.3390/met12081304
- [10] **Xia Y., Luo S.D., Wu X., Schaffer G.B., Qian M.** The sintering densification, microstructure and mechanical properties of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy with a small addition of copper // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 559. P. 293–300. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.100
- [11] **Xia Y., Yu P., Schaffer G.B., Qian M.** Cobalt-doped Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by cold compaction and pressureless sintering // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 574. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.023
- [12] **Zhang C., Pan Y., Hui T., Xu W., Zhang S., Mughal M.A., Zhang J., Lu X.** The sintering densification, microstructure and mechanical properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb by a small addition of Sn-Al powder // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 6947–6955. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.096
- [13] **Satterlee N., Torresani E., Olevsky E., Kang J.S.** Automatic detection and characterization of porosities in cross-section images of metal parts produced by binder jetting using machine learning and image augmentation // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. Vol. 35. Iss. 3. P. 1281–1303. DOI: 10.1007/s10845-023-02100-9
- [14] **Cabo Rios A., Hryha E., Olevsky E., Harlin P.** Sintering anisotropy of binder jetted 316L stainless steel: Part II – microstructure evolution during sintering // *Powder Metallurgy*. 2022. Vol. 65. Iss. 4. P. 283–295. DOI: 10.1080/00325899.2021.2020486
- [15] **Bafaluy Ojea S., Torrents-Barrena J., Pérez-Prado M.T., Muñoz Moreno R., Sket F.** Binder jet green parts microstructure: advanced quantitative analysis // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23. P. 3974–3986. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.051
- [16] **Zago M., Lecis N.F.M., Vedani M., Cristofolini I.** Dimensional and geometrical precision of parts produced by binder jetting process as affected by the anisotropic shrinkage on sintering // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 43. Art. no. 102007. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102007
- [17] **Wang Y., Zhao Y.F.** Investigation of Sintering Shrinkage in Binder Jetting Additive Manufacturing Process // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 10. P. 779–790. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.077
- [18] **Soyama J., Oehring M., Ebel T., Kainer K.U., Pyczak F.** Sintering Behavior and Microstructure Formation of Titanium Aluminide Alloys Processed by Metal Injection Molding // *JOM*. 2017. Vol. 69. Iss. 4. P. 676–682. DOI: 10.1007/s11837-016-2252-z

[19] **Djanarthany S., Viala J.-C., Bouix J.** An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti_3Al and $TiAl$ // *Materials Chemistry and Physics*. 2001. Vol. 72. Iss. 3. P. 301–319. DOI: 10.1016/S0254-0584(01)00328-5

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРАЧЕВА Анна Максимовна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

ПОЛОЗОВ Игорь Анатольевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: igor.polozov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

БОРИСОВ Артем Николаевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: borisov_an@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8321-4247>

СУФИЯРОВ Вадим Шамилевич – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] **F. Appel, J.D.H. Paul, M. Oehring**, *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*, Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (Germany), 2011. DOI: 10.1002/9783527636204

[2] **B.P. Bewlay, S. Nag, A. Suzuki, M.J. Weimer**, TiAl alloys in commercial aircraft engines, *Materials at High Temperatures*, 33 (4–5) (2016) 549–559. DOI: 10.1080/09603409.2016.1183068

[3] **D. Wimler, J. Lindemann, M. Reith, A. Kirchner, M. Allen, W.G. Vargas, M. Franke, B. Klöden, T. Weißgärber, V. Güther, M. Schloffer, H. Clemens, S. Mayer**, Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing, *Intermetallics*, 131 (2021) 107109. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107109

[4] **J.J.S. Dilip, H. Miyanaji, A. Lassell, T.L. Starr, B. Stucker**, A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing, *Defence Technology*, 13 (2) (2017) 72–76. DOI: 10.1016/j.dt.2016.08.001

[5] **I. Polozov, V. Sufiiarov, A. Shamshurin**, Synthesis of titanium orthorhombic alloy using binder jetting additive manufacturing, *Materials Letters*, 243 (2019) 88–91. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.027

[6] **M. Li, W. Du, A. Elwany, Z. Pei, C. Ma**, Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142 (9) (2020) 090801. DOI: 10.1115/1.4047430

[7] **M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H.Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda, M. Takeyama**, Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, *Additive Manufacturing*, 13 (2017) 61–70. DOI: 10.1016/j.addma.2016.11.001

- [8] **M.G. Scaramuccia, A.G. Demir, L. Caprio, O. Tassa, B. Previtali**, Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.010
- [9] **I. Polozov, A. Gracheva, A. Popovich**, Processing, Microstructure, and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured Ti2AlNb-Based Alloy with Carbon, Boron, and Yttrium Microalloying, *Metals*, 12 (8) (2022) 1304. DOI: 10.3390/met12081304
- [10] **Y. Xia, S.D. Luo, X. Wu, G.B. Schaffer, M. Qian**, The sintering densification, microstructure and mechanical properties of gamma Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy with a small addition of copper, *Materials Science and Engineering: A*, 559 (2013) 293–300. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.100
- [11] **Y. Xia, P. Yu, G.B. Schaffer, M. Qian**, Cobalt-doped Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy fabricated by cold compaction and pressureless sintering, *Materials Science and Engineering: A*, 574 (2013) 176–185. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.023
- [12] **C. Zhang, Y. Pan, T. Hui, W. Xu, S. Zhang, M.A. Mughal, J. Zhang, X. Lu**, The sintering densification, microstructure and mechanical properties of Ti–48Al–2Cr–2Nb by a small addition of Sn–Al powder, *Journal of Materials Research and Technology*, 15 (2021) 6947–6955. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.096
- [13] **N. Satterlee, E. Torresani, E. Olevsky, J.S. Kang**, Automatic detection and characterization of porosities in cross-section images of metal parts produced by binder jetting using machine learning and image augmentation, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35 (3) (2024) 1281–1303. DOI: 10.1007/s10845-023-02100-9
- [14] **A. Cabo Rios, E. Hryha, E. Olevsky, P. Harlin**, Sintering anisotropy of binder jetted 316L stainless steel: Part II – microstructure evolution during sintering, *Powder Metallurgy*, 65 (4) (2022) 283–295. DOI: 10.1080/00325899.2021.2020486
- [15] **S. Bafaluy Ojea, J. Torrents-Barrena, M.T. Pérez-Prado, R. Muñoz Moreno, F. Sket**, Binder jet green parts microstructure: advanced quantitative analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, 23 (2023) 3974–3986. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.02.051
- [16] **M. Zago, N.F.M. Lecis, M. Vedani, I. Cristofolini**, Dimensional and geometrical precision of parts produced by binder jetting process as affected by the anisotropic shrinkage on sintering, *Additive Manufacturing*, 43 (2021) 102007. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102007
- [17] **Y. Wang, Y.F. Zhao**, Investigation of Sintering Shrinkage in Binder Jetting Additive Manufacturing Process, *Procedia Manufacturing*, 10 (2017) 779–790. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.077
- [18] **J. Soyama, M. Oehring, T. Ebel, K.U. Kainer, F. Pyczak**, Sintering Behavior and Microstructure Formation of Titanium Aluminide Alloys Processed by Metal Injection Molding, *JOM*, 69 (4) (2017) 676–682. DOI: 10.1007/s11837-016-2252-z
- [19] **S. Djanarthany, J.-C. Viala, J. Bouix**, An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti₃Al and TiAl, *Materials Chemistry and Physics*, 72 (3) (2001) 301–319. DOI: 10.1016/S0254-0584(01)00328-5

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna M. GRACHEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

Igor A. POLOZOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: igor.polozov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

Artem N. BORISOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: borisov_an@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8321-4247>

Vadim S. SUFIAROV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 05.06.2024; Одобрена: 25.06.2024; Принята: 27.06.2024.

Submitted: 05.06.2024; Approved: 25.06.2024; Accepted: 27.06.2024.