

УДК 669.017.165

А.Г. Евгенов¹, О.А. Базылева¹, В.А. Королев¹, Э.Г. Аргинбаева¹**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВА
НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni₃Al ТИПА ВКНА-4УР
В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-31-35

Рассмотрены типичные дефекты литой структуры сплава типа ВКНА-4УР, связанные с неблагоприятным выделением карбидной фазы. Установлено, что в процессе селективного лазерного сплавления с подогревом платформы построения обеспечивается формирование плотного, лишенного трещин, материала при исключительно равномерном распределении карбидов в объеме металла по границам ячеек. Исследованы особенности эволюции структуры синтезированного материала в процессе последующей термической и газостатической обработки. Показано, что равномерное и дискретное распределение карбидов сохраняется при их коагуляции, а для синтезированного материала после термической обработки характерно наиболее благоприятное «лабиринтное» строение частиц γ' -фазы и большее, по сравнению с литым вариантом, количество вторичной упрочняющей фазы, что предполагает высокие циклические характеристики.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 7.3. «Создание интерметаллических никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, аддитивные технологии, интерметаллический сплав, интерметаллид Ni₃Al, γ' -фаза, микроструктура, карбидная фаза.

Typical defects of intermetallic cast alloy VKNA-4UR connected with adverse allocation of carbide phase are considered. It is found that selective laser sintering with warming creation platform allows forming dense material without any cracks, with uniform distribution of carbides in metal volume on grain boundaries. Evolution of the synthesized material structure after heat treatment and high isostatic pressure processing are investigated. It is demonstrated that uniform and discrete distribution of carbides remains at their coagulation, for the synthesized material after heat treatment the optimum «maze» of the γ' -phase morphology and higher quantity of secondary strengthening phase is detected, which lead to increase of fatigue life compared with the cast alloy.

This work is executed within implementation of the complex scientific direction 7.3. «Creation of nickel-based intermetallic alloys and composite materials on their basis» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: selective laser sintering, additive technology, Ni₃Al-based intermetallic alloy, γ' -phase, microstructure, carbide phase.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al имеют наиболее высокую рабочую температуру (до 1200°C) среди никелевых сплавов. К их основным преимуществам относятся: более низкая плотность по сравнению со сплавами типа ЖС, высокая структурная стабильность и стабильность свойств при рабочих температурах [2, 3]. Данные сплавы наиболее перспективны для изготовления деталей соплового аппарата (сопловые лопатки и блоки сопловых лопаток, створки регулируемого сопла), экранов и проставок, элементов камеры сгорания и неохлаждаемых лопаток, в частности для малоразмерных газотрубинных двигателей. На основе интерметаллида Ni₃Al разработаны сплавы для моно- и поликристаллического литья [4–8]. При этом спла-

вы для поликристаллических отливок дополнительно легированы углеродом. Образующиеся в таких сплавах карбиды помимо положительной роли, связанной с упрочнением границ зерен, могут играть и отрицательную роль. Из-за высокой чувствительности к условиям литья в ряде случаев возможно образование карбидов неблагоприятной морфологии в виде «китайских иероглифов» и пластин, что значительно снижает статические характеристики и выносливость материала. В последнее время проведен большой комплекс работ, направленных на совершенствование структуры сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al, в том числе и полученной при равноосном литье, благодаря применению с положительными результатами специальных режимов термической обработки и газостатирования

[9–12]. Альтернативой «исправлению» структуры может стать переход на изготовление деталей из интерметаллидных сплавов методами аддитивных технологий. Основные работы по получению деталей из интерметаллидных сплавов за рубежом связаны с технологией электронно-лучевого вакуумного сплавления металлических порошков (EBM – Electron Beam Melting) [13–18]. Считается, что получить плотный материал, без трещин и развитой пористости по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) невозможно. Задача данной работы – определение перспектив применения технологии СЛС для изготовления деталей горячего тракта ГТД из сплава типа ВКНА-4УР и оценки возможных преимуществ такой технологии.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран углеродистый сплав на основе интерметаллида Ni_3Al типа ВКНА-4УР, предназначенный для отливки деталей с поликристаллической структурой. Из заготовок данных сплавов получали порошок методом атомизации (распыления расплава потоком аргона) на установке HERMIGA 10/100 VI. Гранулометрический состав порошка 10–50 мкм. Рассев порошка осуществляли в промышленном виброгрохоте ConceptLaser QM Powder. Проводили также отделение тонкой (<10 мкм) фракции на

газодинамическом сепараторе (классификаторе) установки HERMIGA 10/100 VI.

Процесс СЛС порошка проводили в установках ConceptLaser M2 Cusing (Германия) и EOS M290 (Германия). Сплавление порошка осуществляли в среде азота (вырабатываемого штатным генератором Midigas 2 фирмы ConceptLaser) и аргона (высший сорт, ГОСТ 10157–79). Синтез на установке EOS M290 (Германия) выполняли при подогреве платформы построения до максимальной температуры, а на установке ConceptLaser M2 Cusing (Германия) – без дополнительного подогрева.

Высокотемпературную газостатическую обработку проводили во ФГУП «ВИАМ» в газостате Quintus-16 фирмы ASEA (Швеция), имеющем молибденовый двухзонный нагреватель (размеры горячей зоны $\varnothing 200 \times 600$ мм).

Микроструктуру отливок лопаток исследовали в состоянии после СЛС, термовакуумной обработки и после горячего изостатического прессования (морфология γ' -фазы, состояние эвтектической и карбидной фаз, наличие трещин и пор) на растровом электронном микроскопе JSM-840.

Результаты и обсуждение

Примеры наиболее неблагоприятной морфологии карбидов в литом сплаве типа ВКНА-4УР приведены на рис. 1, б, в. Протяженные тонкие

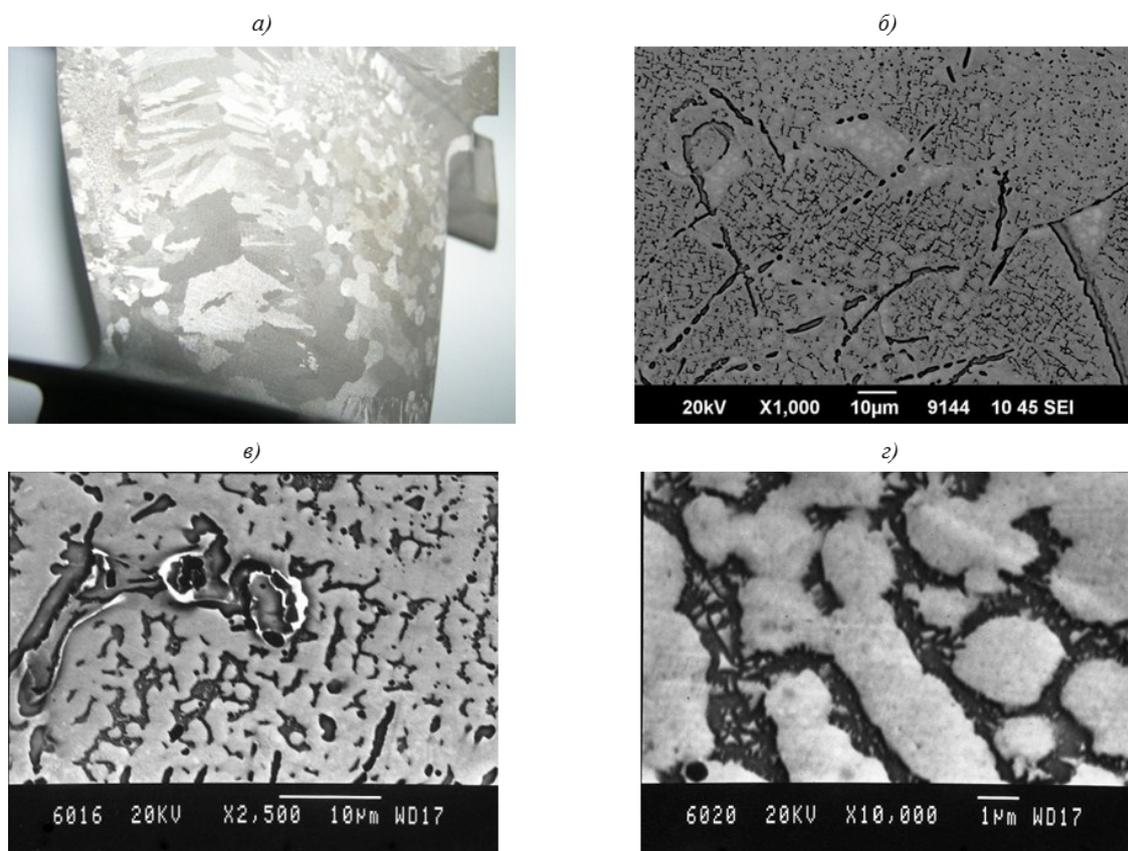


Рис. 1. Макро- (а) и микроструктура отливки рабочей лопатки из сплава типа ВКНА-4УР: б, в – карбиды; з – рафт-структура

«иголки» длиной в десятки и даже сотни микрометров, крупные пластины и/или выделения в виде «усов» или «китайских иероглифов» являются концентраторами напряжений в структуре литого материала и могут существенно снизить статические и циклические характеристики сплава [7]. Элементы рафт-структуры, формирование которой может быть связано как с воздействием нагрузки при высоких температурах (рис. 1, *з*), так и с вытянутостью отдельных зерен в тонких сечениях отливки (например – в пере лопатки), также неблагоприятны с точки зрения торможения трещины при циклических нагрузках. Вероятность появления таких дефектов структуры определяется не только возможными отклонениями в процессе литья, но и сечениями и «тепловыми узлами» отливки, а точнее – специфическими условиями кристаллизации (рис. 1, *а*).

Исходным материалом для аддитивных технологий, таких как СЛС, служит мелкодисперсный металлический порошок, как правило, фракции 10–63 мкм. Такой материал, полученный методом газовой атомизации, изначально имеет исключительно высокую однородность по химическому составу и тонкодисперсное строение, что связано с высокими скоростями кристаллизации: $(10^4\text{--}10^5)^\circ\text{C}/\text{с}$. При технологии послойного лазерного синтеза в процессе охлаждения расплавленного трека достигаются еще более высокие скорости кристаллизации – вплоть до $(10^7)^\circ\text{C}/\text{с}$. Столь высокие скорости обусловлены малой толщиной (~40–50 мкм) сплавляемого слоя и малой шириной трека, равной диаметру фокального пятна лазера+зона отверждения. При этом отвод тепла осуществляется в массивную монолитную плиту.

В процессе кристаллизации внутри трека формируются субзерна, состоящие из определенного образом ориентированных ячеек – осей дендритов первого порядка. При этом в продольном и поперечном сечении видна исключительная равномерность их размеров: 0,5–1 мкм. Столь же равномерно по границам ячеек выделяются карбиды (рис. 2, *а*, *б*). В процессе последующей термической обработки синтезированного металла равномерность распределения карбидов сохраняется, они приобретают огранку, коагулируют, однако дискретный характер их выделений остается, что хорошо видно при исследованиях шлифов без травления (рис. 2, *в*).

Исследования шлифов после травления показывают, что крупные скоагулированные карбиды располагаются преимущественно внутри частиц γ' -фазы. При этом γ' -фаза в синтезированном металле имеет наиболее благоприятную морфологию: образует «лабиринтную» структуру, предпочтительную с точки зрения торможения усталостной трещины (рис. 2, *з*). Кроме того, именно в синтезированном металле отмечается формирова-

ние большого количества дисперсных частиц вторичной упрочняющей γ' -фазы размером 0,5–1 мкм, что также должно способствовать повышению длительной прочности и усталостных характеристик такого материала (рис. 2, *д*).

Основная проблема для синтезированного литейного сплава, и в частности интерметаллидного сплава типа ВКНА-4УР, – наличие трещин, что связано именно с высокими скоростями кристаллизации. Первые эксперименты на установке без подогрева платформы построения не позволили получить материал без трещин во всем исследованном интервале энергоскоростных параметров (рис. 3, *а*). При этом трещины, образующие сплошную сетку, очевидно, имеют сообщение друг с другом и с поверхностью, что делает заведомо неэффективным применение газостатирования для повышения плотности материала.

Отработанный оптимальный режим синтеза с применением подогрева платформы построения позволил получить образцы с объемной долей несплошностей, не превышающей 0,15% (рис. 3, *б*). Необходимо отметить, что на современных серийных установках СЛС реализована система подогрева платформы только до температуры 200°C , в то время как для установок электронно-лучевого сплавления она может достигать 1000 и даже 1100°C . Точность построения, вследствие значительно большего диаметра электронного луча по сравнению с фокальным пятном лазера, для установок СЛС достигается значительно более высокая, что позволяет получать не заготовку, а практически готовую деталь (лопатку, сопловой блок и т. п.) с минимальной последующей обработкой свободной поверхности и мест подведения поддержек.

Разработанные режимы предварительной термовакуумной обработки и горячего изостатического прессования позволили получить материал, в котором пор и трещин на пределе обнаружения метода в исследованных образцах выявить не удалось.

Таким образом, показана потенциальная возможность получения методом СЛС материала, по плотности сравнимого с самыми лучшими образцами материала для поликристаллического литья, но исключающего образование характерных для данного сплава структурных дефектов.

Заключения

Рассмотрены характерные для интерметаллидного сплава типа ВКНА-4УР структурные дефекты, связанные с нарушением температурного режима плавки и особенностями геометрической формы деталей и сдерживающие его более широкое внедрение в современном авиационном двигателестроении.

Показана возможность формирования плотного, лишённого трещин материала в процессе СЛС с подогревом платформы построения с обеспече-

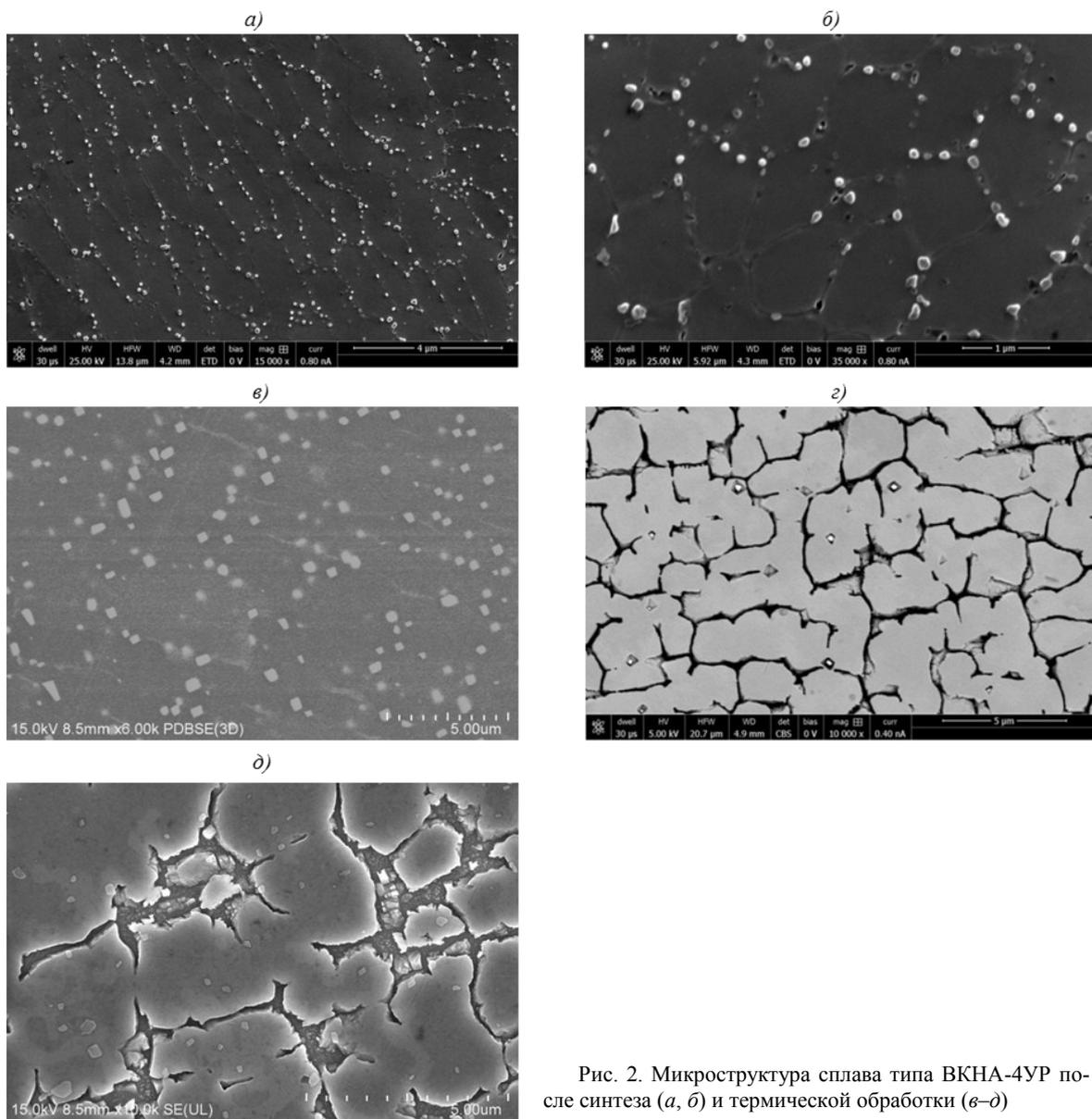


Рис. 2. Микроструктура сплава типа ВКНА-4УР после синтеза (а, б) и термической обработки (в-г)

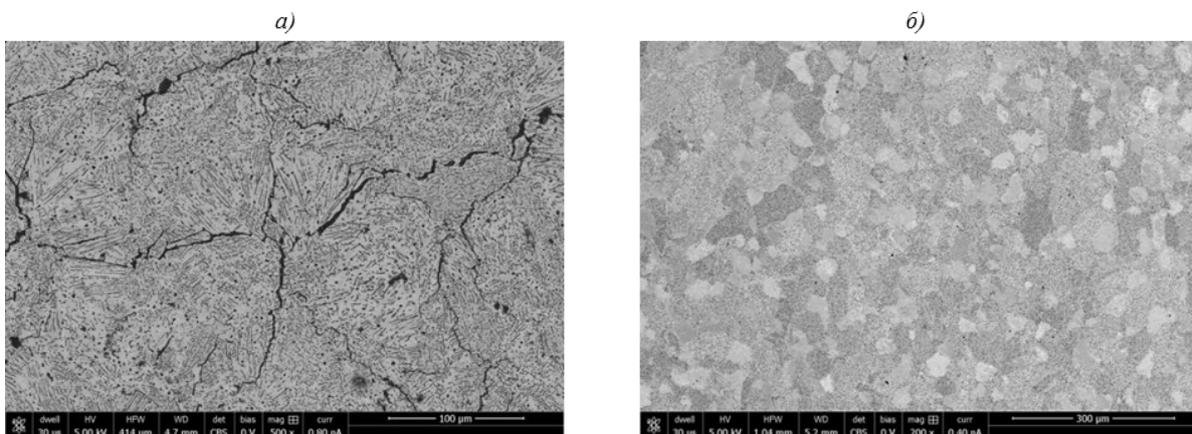


Рис. 3. Микроструктура сплава типа ВКНА-4УР после синтеза без подогрева (а) и с подогревом (б) платформы построения

нием исключительного равномерного распределения карбидов в объеме металла по границам ячеек.

Исследованы особенности эволюции структуры синтезированного материала в процессе последующей термической и газостатической обработки. Показано, что равномерное и дискретное распределение карбидов сохраняется при их коа-

гуляции, а для синтезированного материала после термической обработки характерно наиболее благоприятное «лабиринтное» строение частиц γ' -фазы и большее, по сравнению с литьем, количество вторичной упрочняющей γ' -фазы, что предполагает высокие циклические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-3.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 13–19.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Интерметаллидные сплавы на основе Ni_3Al // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №5. С. 27–29.
4. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 57–60.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе γ' -фазы для лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 34–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-34-40.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 26–31.
7. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 117–129.
8. Туренко Е.Ю., Базылева О.А., Шестаков А.В. Современные перспективные высокотемпературные интерметаллидные сплавы серии ВИН // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №3. Ст. 10. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 27.07.2016).
9. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г. Влияние термической обработки на структуру и жаропрочность ренийсодержащего интерметаллидного сплава на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 21–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-21-26.
10. Li P., Li S.S., Han Y.F. Influence of solution heat treatment on microstructure and stress rupture properties of a Ni_3Al base single crystal superalloy IC6SX // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 182–186.
11. Motonori Nakamura, Masahiko Demura, Ya Xu and Toshiyuki Hirano. Effect of Heat Treatment on the Ductility of $Ni(\gamma)/Ni_3Al(\gamma')$ Two-phase Alloy Foils // *Advanced Intermetallic Based Alloys*. Boston, Massachusetts, USA. 2006. November, 27–30. P. 548–554.
12. Józwick P., Bojar Z. Influence of Heat Treatment on the Structure and Mechanical Properties of Ni_3Al -Based Alloys // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2010. Vol. 55. Issue 1. P. 271–279.
13. Sabbadini S., Tassa O., Gennaro P., Ackelid U. Additive Manufacturing of Gamma Titanium Aluminide Parts by Electron Beam Melting // *TMS 2010. 139th Annual Meeting & Exhibition. Materials Processing and Properties*. Seattle, WA. P. 267–274.
14. Franzen S.F., Karlsson J., Dehoff R., Ackelid U., Rios O., Parish C., Peters W. Microstructural Properties of Gamma Titanium Aluminide Manufactured by Electron Beam Melting // *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 2011. Vol. 3. P. 455–462.
15. Baudana G., Biamino S., Ugues D., Lombardi M., Fino P., Pavese M., Badini C. Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by Electron Beam Melting: Contribution of Politecnico di Torino // *Metal Powder Report*. Vol. 71. Issue 3. 2016. May–June. P. 193–199.
16. Terner M., Biamino S., Ugues D., Sabbadini S., Fino P., Pavese M., Badini C. Phase transitions assessment on γ -TiAl by Thermo Mechanical Analysis // *Intermetallics*. 2013. Issue 37. P. 7–10.
17. Biamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M., Gennaro P., Badini C. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 776–781.
18. Loeber L., Biamino S., Ackelid U., Sabbadini S., Epicoco P., Fino P., Eckert J. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides // *Conference: Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2011. P. 547–556.