

Ю. А. МАРЧЕНКО¹, И. А. ПЕТРИК¹, А. В. ОВЧИННИКОВ², А. А. СКРЕБЦОВ²¹ АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина² Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

На сегодняшний день, в авиадвигателестроении и аэрокосмической отрасли находят применение аддитивные технологии производства заготовок из жаропрочных титановых сплавов. Однако, механизмы формирования структуры и уровень механических свойств в таких заготовках мало изучены и представляют интерес. Имеющихся в настоящее время данных не достаточно для уверенного применения аддитивных технологий в производстве авиационных двигателей. В работе проведена оценка микроструктуры и обоснована возможность повышения механических свойств заготовок деталей ГТД, из титанового сплава марки ВТ20, полученных методом лазерно-порошковой аддитивной наплавки. Для проведения исследований, были выращены заготовки с размером 215x120x4 мм 120x85x14 мм. В качестве "строительного" материала применялся порошок сферической формы частиц, по химическому составу соответствующий сплаву ВТ20. Результаты исследований показали, что при лазерно-порошковом выращивании в сплаве ВТ20 наблюдается образование "закалочных" структур, обусловленное ускоренным теплоотводом в ранее сформированный слой литого металла. В этой связи, резко повышается прочность сплава и снижается его ударная вязкость и относительное сужение. Следует отметить, что отжиг для снятия напряжений после выращивания ($T=750\pm 10^\circ\text{C}$, время выдержки - 1,5...2,0 ч.) не оказывает существенного влияния на уровень механических свойств. При подъеме температур отжига до уровня критических, в сплаве ВТ20 наблюдаются значительные структурные изменения, что в свою очередь оказывает влияние на его механические свойства. На основании анализа микроструктур и результатов механических испытаний после отличительных видов термообработки (800°C , 850°C , 920°C , время выдержки - 60...75 мин.) установлено, что повышение пластических свойств сплава ВТ20 достигается при нагреве образцов, до температуры близкой к температуре полиморфного превращения ($960\text{...}1000^\circ\text{C}$). Отжиг заготовок после наплавки по режиму $T=920\pm 10^\circ\text{C}$, время выдержки - 60...75 мин. позволяет несколько снизить прочностные характеристики сплава ВТ20, при этом повышает его ударную вязкость и относительное сужение.

Ключевые слова: аддитивные технологии; лазерно-порошковая наплавка; титановый сплав ВТ20; отжиг; механические свойства; послойное выращивание; ударная вязкость; параметры режима.

Введение

На сегодняшний день аддитивные процессы выращивания занимают значительную нишу на рынке изготовления изделий и основательно укрепились в ювелирной промышленности, медицине, машиностроении, литейном производстве и др. Многими авторами предложена и теоретически обоснована возможность применения аддитивных технологий в самолетостроении, двигателестроении и космической отрасли [1].

Неоспоримые преимущества аддитивной 3Д наплавки изделий из металла, в скором времени, позволят выполнить стремительный переход от материалоемких традиционных технологий получения заготовок (литье, штамповка, обработка резанием и др.) к трехмерной печати безприпусковых изделий

или изделий с минимальным припуском на механическую обработку. В свою очередь, внедрение аддитивного производства заготовок из жаропрочных никелевых и титановых сплавов в авиадвигателестроении, позволит значительно сократить временные и материальные затраты на изготовление отличительных деталей и узлов при разработке новейших конструкций авиадвигателей VII поколения.

Как известно [2], в конструкциях современных авиационных двигателей преобладают детали из титановых сплавов, а их количество может варьироваться от 30 до 40% от общего количества деталей. Существенные преимущества титановых сплавов в сравнении со сталью, в частности по весовым и коррозионностойким характеристикам, позволили им прочно утвердиться в составе узлов так называемой холодной части газотурбинного двигателя [3].

В этой связи, снижение себестоимости изготовления или сокращение производственного цикла обработки отличительных заготовок из титановых сплавов экономически обосновано и является целесообразным. Согласно данным различных источников [4] экономия материала, при применении аддитивных технологий, может достигать до 90% стоимости готового изделия.

1. Постановка задачи

В настоящее время мало изучены механизмы формирования структуры и уровень механических свойств жаропрочных титановых сплавов, полученных различными методами аддитивной наплавки. Имеющихся данных не достаточно для стремительного внедрения аддитивных технологий в производство авиационных двигателей. В этой связи, представляет интерес проведение оценки структуры и механических свойств образцов из титанового сплава BT20, полученных методом лазерно-порошкового аддитивного выращивания.

В работе исследовано закономерности формирования структуры и свойств в титановом сплаве марки BT20, полученном аддитивным методом прямого выращивания.

2. Экспериментальная часть

Анализ структур проводили на образцах выращенных способом лазерно-порошковой наплавки (ЛПН).

В качестве исходного порошка для выращивания образцов, применялся сферический порошок марки BT20 с размером рабочей фракции -150/+50 мкм украинского производства. Порошок был получен методом центробежного распыления вращающегося слитка в инертной среде аргона. Данный способ получения порошка является наиболее перспективным, поскольку позволяет распылять порошок с высоким коэффициентом сферичности и с максимальным выходом количества рабочей фракции необходимой для прямого выращивания (см. рис. 1).

Результаты металлургического исследования порошка для спекания показали, что его химический состав соответствует сплаву BT20 (табл. 1), гранулометрический состав находится в пределах заяв-

ленной фракции, а текучесть и насыпная плотность обеспечивают возможность его применения для реализации аддитивных процессов прямого выращивания.

Состав исходного порошка определяли количественно, методом химического анализа по ГОСТ 19863-91, а наличие газов факультативно, методом спектрального анализа при помощи газоанализатора LECO TC500. Для определения фракции частиц порошка был проведен ситовый анализ на установке "Ротап" с набором сит мод.029.

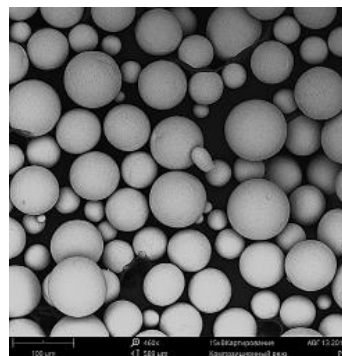


Рис. 1. Порошок марки BT20 с размером рабочей фракции -150/+50 мкм

Для определения закономерностей формирования структуры после переплава была исследована исходная структура порошка марки BT20. Результаты исследований показали, что микроструктура сферических порошков представляет собой α' -фазу, образующуюся в результате закалки (при быстром охлаждении частиц порошка на стадии его изготовления) и характерна для неравновесного состояния сплава BT20 (рис. 2).

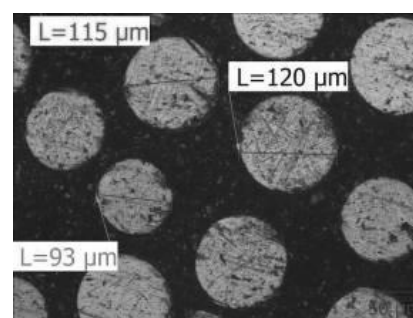


Рис. 2. Микроструктура исходного порошка

Таблица 1

Химический состав исходного порошка сплава BT20

| Порошок | Содержание элементов, % | | | | | | | | |
|---|-------------------------|---------|---------|-----------|-----------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Ti | V | Zr | Mo | Al | C | O ₂ , % | N ₂ , % | H ₂ , % |
| Сферический с размером фракции -150/+50 | осн. | 2,3 | 1,5 | 1,35 | 5,6 | 0,05 | 0,0908 | 0,00221 | 0,00465 |
| Нормы для сплава BT20 по ОСТ 1 90013-81 | осн. | 0,8-2,5 | 1,5-2,5 | 0,5 - 2,0 | 5,5 - 7,0 | не более 0,1 | 0,20 | 0,05 | 0,015 |

В рамках проведения исследовательских работ, методом ЛПН были выращены:

- заготовки с размером 215x120x4мм под изготовление плоских образцов для механических испытаний;
- заготовки с размером 120x85x14мм, под изготовление круглых образцов для механических испытаний;

Внешний вид заготовок под образцы представлен на рисунке 3.

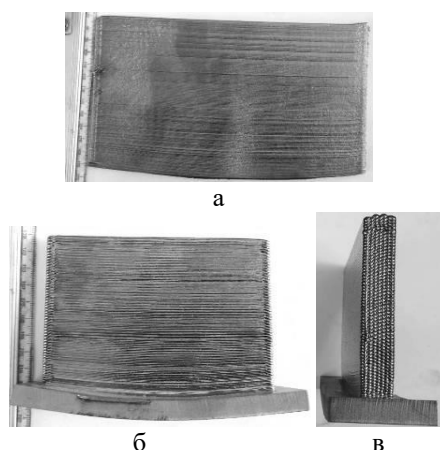


Рис. 3. Заготовки полученные методом лазерно-порошковой наплавки:
а – образец с размером 215x120x4мм;
б, в – образец с размером 120x85x14мм

Лазерно-порошковая наплавка заготовок выполнялось по режимам, указанным в таблице 2.

Таблица 2
Режимы выращивания образцов для исследований и испытаний

| Параметр режима | 120x85x14 мм | 215x120x4 мм |
|--|--------------|---------------|
| Скорость, мм/с | 20 | 20 |
| Мощность, Вт | 2200 | 2200 |
| Продольное смещение, мм | 1,5 | 2 |
| Толщина образца, мм | 14,0 | 4,0 |
| Расход порошка, (г/мин) | 6,5 ... 9,7 | 8,64 ... 10,8 |
| Расстояние от среза головки до рабочей точки, мм | 196 | 196 |
| Расстояние от точки фокуса до рабочей точки, мм | 36 | 36 |

Выращивание образцов с отличительными размерами проводилось с целью определения закономерностей формирования структуры при аддитивной наплавке тонкостенных и толстостенных эле-

ментов будущей конструкции детали (имитация обечайки и фланца на корпусе ГТД).

Следует отметить, что выращивание методом ЛПН заготовок с размером 120x85x14 мм, производилось последовательно, за одну установку в камере (см. рис. 4). Ширина наплавленного валика за один проход составила 3 мм, продольное смещение - 1,5 мм.

Количество валиков, необходимое для выращивания образца шириной 14 мм составило 7 шт.



Рис. 4. Выращивание образцов методом ЛПН

Исследование металла аддитивной наплавки проводилось следующими методами:

- макро и микроструктурным анализом шлифов изготовленных в продольном и поперечном направлении относительно слоёв выращивания;
- испытанием механических свойств на стандартных образцах, изготовленных в продольном и поперечном направлении относительно слоев выращивания;
- сравнением полученных механических свойств со свойствами металла полученного методом литья и деформации.

При макроструктурном анализе продольных и поперечных шлифов было установлено слоистое строение металла, с равномерно чередующимися зонами сплавления (рис. 5).

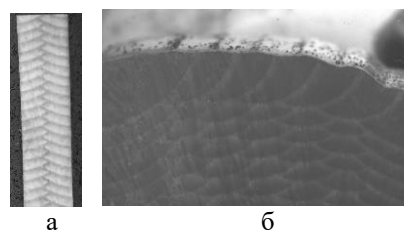


Рис. 5. Внешний вид поперечных макрошлифов исследуемых образцов:

- а – образец с размером 215x120x4 мм;
- б – образец с размером 120x85x14 мм

Дефекты металлургического характера в виде несплавлений, пор, усадочных раковин в плоскости шлифов не выявлены.

Микроструктурный анализ металла проводился на шлифах без травления и травлёных в химических реактивах. Травление шлифов проводилось в реактиве плавиковой кислоты.

Микроструктурный анализ не травленых шлифов выявил наличие микро несплошностей металла в виде микропор с максимальным размером до 66 мкм (рис. 6).

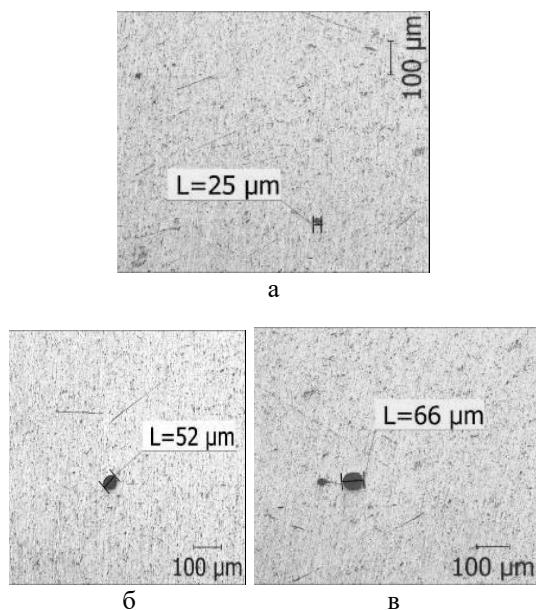


Рис. 6. Внешний вид микропор на не травленном шлифе:
а, б, в – микропоры с размером от 25 до 66 мкм

Исследование травленых шлифов показало, что микроструктура образцов столбчатая, слоистая, характерная для металла, полученного методом многослойной наплавки (рис. 7). Темные полосы на рисунках представляют собой линии сплавления слоев.

Микроструктура состоит из первичных зерен β -фазы вытянутых в сторону отвода тепла и имеет тонкопластинчатое строение α - и β -фаз (рис. 8).

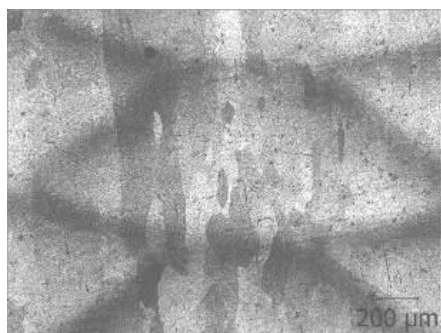


Рис. 7. Структура образца после травления

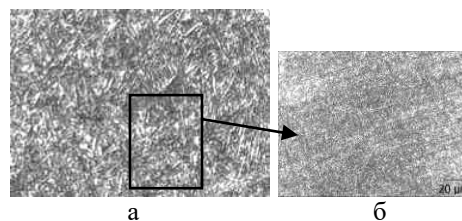


Рис. 8. Тонкопластинчатое строение α - и β -фаз:
а – ув.500^x; б – ув.1000^x

Для сравнения на рис. 9 показана микроструктура металла образца из сплава ВТ20 полученного методом литья.

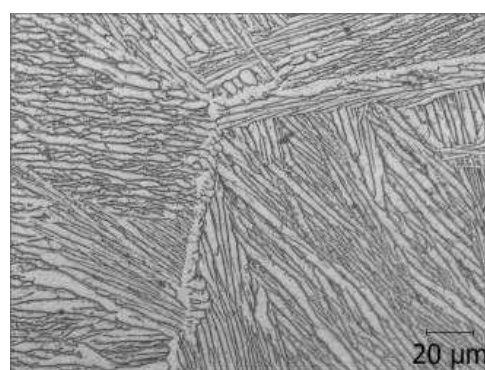


Рис. 9. Пластинчатая структура образца полученного методом литья

На рисунках видно, что структура металла полученного методом ЛПН, отличается от литья тонкопластинчатым строением α - и β -фаз.

Механические свойства образцов из сплава ВТ20 полученного методом ЛПН, определяли на стандартных цилиндрических и плоских образцах по ГОСТ 1497-84 "Металлы. Методы испытаний на растяжение". Образцы вырезали в продольном и поперечном направлении относительно слоёв выращивания. Механические свойства определялись на образцах после отжига при $T=750^{\circ}\text{C}$, выдержка 1,5...2 часа. Результаты представлены в таблице 3.

Согласно данным ВИАМ, для повышения механических свойств поковок, штамповок и плит из сплава ВТ20, допускается повышение температуры отжига до 900°C . Принимая во внимание данную информацию, решено, что изменение структуры и механических свойств (ψ , КСУ, $\text{HB}_{10/3000}$) может быть достигнуто путем повышения температуры отжига до уровня близкой к температуре полиморфного превращения ($T_{\text{пл}}$) сплава ВТ20.

Опытно-исследовательская работа по оценке влияния температурного режима отжига на изменение структуры материала выполнялась на металлографических образцах с размером $\sim 10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$.

Таблиця 3

Результаты механических испытаний, выращенных образцов при комнатной температуре

| Образец | ТО | $\sigma_{в,}$ кгс/мм ² | $\sigma_{0,2}$ кгс/мм ² | δ , % | ψ , % | КСУ, кгс/см ² | НВ (Ø отпечатка 10/3000, мм) |
|-------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|------------------------------------|
| | | | | не менее | | | |
| Свойства при Т=20 °С | | | | | | | |
| Продольный | 750 ±10 °С, | 134,6 | 128,7 | 8,9 | 9,3 | 1,8 | 3,1 |
| Поперечный | 750 ±10 °С, | 130,2 | 120,3 | 8,9 | 9,2 | 1,9 | 3,1 |
| Нормы по ОСТ 1 90000-70 | Отожженные | 90-115 | — | 8 | 20 | 3 | 3,3-3,8 |

Образцы были термообработаны по различным режимам отжига при T=800, 850 и 920°C с выдержкой 60...75 мин.

Микроструктурный анализ образцов термообработанных по различным режимам показал, что структурные изменения после отжига при T=800°C не значительные, наблюдается небольшое изменение параметров пластин α - и β -фаз и оторочки (рис. 10, а, б). С увеличением температуры отжига до T=850 и 920°C изменения этих параметров более существенны. При T=920°C параметры пластин α - и β - фаз и оторочки существенно увеличились, структура металла образцов стала близка к структуре литого металла (см. рис. 9 и рис. 10, г).

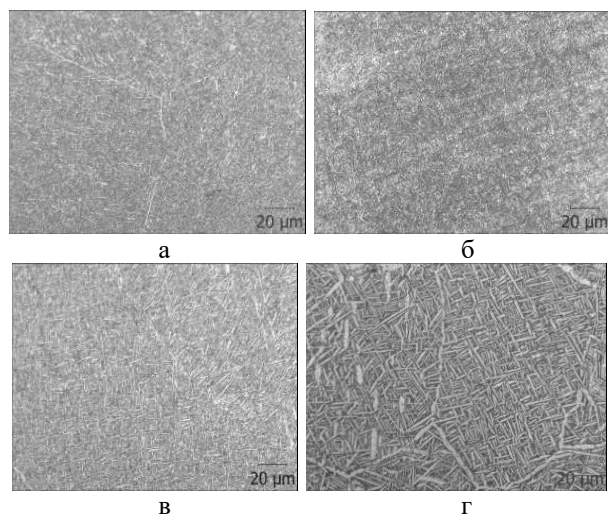


Рис. 10. Микроструктура образцов при разных температурах отжига:
а – T=750°C, б – T=800°C;
в – T=850°C, г – T=920°C

На основании полученных данных было принято решение выполнить полный рекристаллизационный отжиг заготовок для определения механических свойств по режиму T=920±10°C, время выдержки 60...75 мин. При этом следует учесть, что температура отжига не превышает температуру полиморфного превращения сплава ВТ20 которая составляет 960...1000°C.

Результаты механических испытаний образцов прошедших отжиг по отличительному режиму, приведены в табл. 4.

3. Анализ полученных результатов

Из приведенных данных в таблице 3 видно, что после отжига заготовок из сплава ВТ 20 по режиму T=750 ±10 °C, время выдержки - 1,5...2,0 ч. свойства отличаются от требований ОСТ 1 90000-70, а именно:

- предел прочности (σ_b) превышает нормы на 13...17 %;
- относительное удлинение (δ) соответствует нормам;
- относительное сужение (ψ) ниже норм на ~54 %;
- ударная вязкость (KCU) ниже норм на 37...43 %;
- твердость (HB) превышает нормы на ~6 %.

По результатам анализа данных приведенных в таблице 4 можно сказать, что нагрев заготовок полученным методом прямого лазерного выращивания до уровня температур близких к $T_{\text{пл}}$ (920±10°C) с обеспечением времени выдержки в течении 60...75 мин. Значительно повышает пластические

Таблиця 4

Результаты механических свойств сплава ВТ20 прошедшего отжиг по отличительным режимам

| Образец | ТО | $\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ² | $\sigma_{0,2}$ кгс/мм ² | δ , % | ψ , % | КCU, кгс/см ² | НВ (Ø отпечатка 10/3000, мм) |
|-------------------------|------------|--|---------------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|------------------------------------|
| | | | | не менее | | | |
| Продольный | 920 ±10 °С | 115 | 108 | 15,0 | 29,3 | 3,1 | 3,3 |
| Поперечный | 920 ±10 °С | 114 | 103 | 14 | 37,6 | 3,5 | 3,3 |
| Нормы по ОСТ 1 90000-70 | Отожженные | 90-115 | — | 8 | 20 | 3 | 3,3-3,8 |

свойства титанового сплава BT20, что соответствует требованиям норм по ОСТ 1 90000-70 для поковок толщиной 101...250 мм.

Заключение

Принимая во внимание положительные результаты проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Химический состав металла образцов, полученных методом прямого лазерного выращивания с применением отечественного порошка сферической формы частиц, соответствует сплаву типа BT20.

2. Металл, прошедший термическую обработку по режиму отжига: $T=750^{\circ}\text{C}$, время выдержки 90...120 мин., имеет свойства (ψ , КСЧ, $\text{HB}_{10/3000}$) отличающиеся норм ОСТа для поковок, что обусловлено структурой с наличием тонкопластинчатого (близкого к игольчатому) строения α - и β -фаз.

3. Повышения механических свойства аддитивно выращенных заготовок из титанового сплава BT20 возможно достичь путем термической обработки по режиму $T=920\pm 10^{\circ}\text{C}$, время выдержки 60...75 мин.

Литература

1. Реализация аддитивных процессов сварки при проектировании и производстве деталей газотурбинных авиадвигателей [Текст] / А. В. Овчинников, Ю. Ф. Басов, И. А. Петрик и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 7(142). – С. 140-145.

2. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели [Текст] / Г. С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.

3. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст] / А. Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасев, Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. П. Нежурич; под ред. А. Г. Братухина. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.

4. Петрик, И. А. Разработка порошков титановых сплавов для аддитивных технологий применительно к деталям ГТД [Текст] / И. А. Петрик, А. В. Овчинников, А. Г. Селиверстов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(125). – С. 11-16.

References

1. Ovchinnikov, A.V. et al. Realizacija additivnyh processov svarki pri proektirovanii i proizvodstve detalей gazoturbinyh aviadvigatelej [Implementation of welding additive manufacturing processes in design and manufacture of aircraft gas turbine engine parts]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 7(142), pp. 140-146.

2. Skubachevskij, G. S. *Aviacionnye gazoturbinye dvigateli* [Aviation Gas Turbine Engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 544 p.

3. Bratuhin, A. G., Jazov, G. K. et al. *Sovremennye tehnologii v proizvodstve gazoturbinyh dvigatelej* [Modern technologies in the production of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 416 p.

4. Petrik, I. A., Ovchinnikov, A. V., Seliverstov A. G. *Razrabotka poroshkov titanovyh splavov dlja additivnyh tehnologij primenitel'no k detaljam GTD* [Development of titanium alloy powders for additive technologies as applied to gas turbine engine parts]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 8(125), pp. 11-16.

Поступила в редакцию 26.08.2021, рассмотрена на редколлегии 23.09.2021

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ГТД З ЖАРОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВИРОЩУВАННЯ

Ю. А. Марченко, І. А. Петрик, О. В. Овчинников, А. А. Скребецов

На сьогоднішній день, в авіадвигунобудуванні та аерокосмічній галузі знаходять застосування адитивні технології виробництва заготовок з жароміцних титанових сплавів. Однак, механізми формування структури і рівень механічних властивостей в таких заготовках мало вивчені і представляють інтерес. Найважчим в даний час даних не достатньо для впевненого застосування адитивних технологій у виробництві авіаційних двигунів. У роботі проведена оцінка мікроструктури та обґрунтована можливість підвищення механічних властивостей заготовок деталей ГТД, з титанового сплаву марки BT20, які отримані методом лазерно-порошкового адитивного наплавлення. Для проведення досліджень, були вироблені заготовки з розміром 215x120x4 мм 120x85x14 мм. В якості "будівельного" матеріалу застосовувався порошок сферичної форми частинок, за хімічним складом відповідний сплаву BT20. Результати досліджень показали, що при лазерно-порошковому вирощуванні в сплаві BT20 спостерігається утворення "гартівних" структур, обумовлене прискореною тепловіддачею в раніше сформований шар литого металу. У зв'язку з цим, різко підвищується міцність сплаву і знижується його ударна в'язкість та відносне звуження. Слід зазначити, що відпал для зняття напружень після вирощування ($T = 750 \pm 10^{\circ}\text{C}$, час витримки - 1,5 ... 2,0 год.) не створює істотного впливу на рівень механічних властивостей. При підйомі температур відпалу до рівня критичних, в сплаві BT20 спостеріга-

ються значні структурні зміни, що в свою чергу впливає на його механічні властивості. На підставі аналізу мікроструктур і результатів механічних випробувань, після відмінних видів термообробки (800 ° C, 850 ° C, 920 ° C, час витримки - 60 ... 75 хв.) встановлено, що підвищення пластичних властивостей сплаву BT20 спостерігається при нагрівання зразків, до температури близької до температури поліморфного перетворення (960 ... 1000 ° C). Відпал заготовок після наплавлення по режиму $T = 920 \pm 10$ ° C, час витримки - 60 ... 75 хв. дозволяє трохи знизити міцність сплаву BT20, при цьому підвищується його ударна в'язкість і відносне звуження.

Ключові слова: адитивні технології; лазерно-порошкове наплавлення; титановий сплав BT20; відпал; механічні властивості; пошарове вирощування; ударна в'язкість; параметри режиму.

WAYS TO INCREASE THE PROPERTIES OF BLOTS OF GAS TURBINE ENGINE PARTS FROM HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOYS OBTAINED BY DIRECT LASER GROWTH

Y. Marchenko, I. Petrik, A. Ovchinnikov, A. Screbtsov

Today, additive technologies for the production of billets from heat-resistant titanium alloys are used in aircraft engine building and the aerospace industry. However, the mechanisms of structure formation and the level of mechanical properties in such blanks are poorly understood and are of interest. Currently, available data are not sufficient for the confident application of additive technologies in the production of aircraft engines. This paper evaluates the microstructure and substantiates the possibility of improving the mechanical properties of workpieces of GTE parts made of VT20 titanium alloy, obtained by laser-powder additive surfacing. For research, workpieces with a size of 215x120x4 mm 120x85x14 mm were grown. As a "building" material, a powder of spherical shape of particles was used, the chemical composition of which corresponds to the alloy VT20. The research results showed that during laser-powder growth in the VT20 alloy, the formation of "hardening" structures is observed, due to the accelerated heat removal into the previously formed layer of cast metal. In this regard, the strength of the alloy sharply increases, and its impact toughness and relative narrowing decrease. Note that stress relief annealing after growing ($T = 750 \pm 10$ ° C, holding time - 1.5 ... 2.0 h.) does not significantly affect the level of mechanical properties. When the annealing temperatures rise to critical levels, significant structural changes are observed in the VT20 alloy, which in turn affects its mechanical properties. Based on the analysis of microstructures and the results of mechanical tests after distinct types of heat treatment (800 ° C, 850 ° C, 920 ° C, holding time - 60...75 min.), it was found that an increase in the plastic properties of the VT20 alloy is observed when the samples are heated to temperatures close to the temperature of the polymorphic transformation (960...1000 ° C). Annealing of workpieces after surfacing according to mode $T = 920 \pm 10$ ° C, holding time - 60...75 min. allows to somewhat reduce the strength characteristics of the VT20 alloy, while increasing its impact strength and relative narrowing.

Keywords: additive technologies; laser-powder surfacing; titanium alloy VT20; annealing; mechanical properties; layer-by-layer cultivation; impact strength; mode parameters.

Марченко Юрий Анатольевич – вед. инж. по сварке, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Петрик Игорь Андреевич – канд. техн. наук, главный сварщик, АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Овчинников Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Оборудование и технология сварочного производства», Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Скребцов Андрей Андреевич – канд. техн. наук, доц. каф. механики, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Yrii Marchenko – lead engineer of welding of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: marchenko2126@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2189-0976.

Igor Petrik – Candidate of Technical Science, chief welder of JSC "Motor Sich", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0001-6600-1661.

Aleksandr Ovchinnikov – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Equipment and Technology of Welding Production, NU "Zaporizhzhya Politech", Zaporozhye, Ukraine, ORCID: 0000-0002-5649-1094.

Andrei Skrebtsov – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Mechanics, NU "Zaporizhzhya Politech", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: nic_tz@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4669-9625.