

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СПОСОБОМ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ УЗЛОВ ВЕРТОЛЕТОВ И ГТД*

И. А. Петрик, С. Л. Чигилейчик, Т. А. Митина,
Ю. А. Марченко, М. О. Гнатенко
АО «МОТОР СИЧ».

69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В работе освещен перспективный способ изготовления широкой номенклатуры крупногабаритных корпусных титановых деталей и узлов ГТД с применением технологии плазменной наплавки с присадочным материалом (проволокой). Проведена оценка структуры и механических свойств заготовок деталей из титановых сплавов, полученных выращиванием с применением плазменной наплавки, в сравнении с классическими способами их изготовления, такими как штамповка и литье. Показана экономическая эффективность данной технологии по сравнению с лазерно-порошковым способом выращивания заготовок деталей. Библиогр. 5, табл. 2, ил. 13.

Ключевые слова: плазменная наплавка; проволока; выращивание; титановые сплавы; механические свойства

Выращивание деталей способом послойной наплавки является одним из элементов аддитивного производства (АП), которое в последние годы стало очень перспективным направлением развития мировой промышленности. Аддитивные технологии (АТ) являются новыми технологиями производства деталей из металла, которые в целом ряде случаев могут заменить классические способы, такие как литье и штамповку. Среди основных преимуществ данной технологии можно выделить то, что с помощью автоматизированного компьютерного управления появляется возможность послойного изготовления нового изделия по его 3D модели. При этом значительно сокращаются время и затраты на получение нового изделия за счет исключения промежуточных стадий изготовления оснастки и пресс-форм. Это дает возможность осуществить опытную реализацию конструкторского проекта (при проектировании новых изделий или доработки существующих с целью улучшения технико-эксплуатационных характеристик) с минимальными затратами в кратчайшие сроки.

Помимо этого, данная технология дает возможность:

минимизировать влияние «человеческого фактора»;

сократить численность персонала, решив проблему нехватки квалифицированного персонала (модельщиков, формовщиков и т. д.);

устранить необходимость содержания, хранения и ремонта модельной оснастки, особенно для относительно крупногабаритных изделий;

улучшить условия труда.

К настоящему времени разработан целый ряд различных технологий аддитивного производства металлов, в т. ч. и титановых сплавов, различающихся по следующим параметрам:

расходуемому материалу (порошок, проволока или порошок в смеси со связующим веществом);

источнику нагрева (лазер, электронный луч, плазма, электрическая дуга и т. п.);

методу формирования слоев (выборочное расплавление (спекание) подготовленного слоя порошка, прямое сплавление присадочного материала на предыдущий слой или инъекционное литье) [1–5].

На данный момент при изготовлении изделий из титановых сплавов более широко применяются технологии на основе оборудования для лазерного или электронно-лучевого сплавления с использованием в качестве присадочного материала порошков.

Основное преимущество данных способов — это возможность получения изделий с высокой геометрической точностью и чистотой поверхно-

*По материалам доклада, представленного на Международной конференции «Титан-2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.



Рис. 1. Внешний вид пластины, полученной плазменной наплавкой в среде аргона с применением проволоки из сплава Ti-6Al-4V

сти. Однако производительность данных способов очень низкая (до 1 кг/ч), что ограничивает их применение при изготовлении крупноразмерных корпусных изделий.

Также следует отметить относительно высокую стоимость пригодных для аддитивных процессов титановых порошков по сравнению с аналогичными марками проволок (порошки — 400...550, проволока — 50...100 евро за 1 кг) и дорогостоящее для данных способов оборудование (более 1 млн. евро). Поэтому перспективным направлением для выращивания крупноразмерных корпусных титановых изделий может стать применение плазменной наплавки с использованием проволоки в качестве присадки. Оборудование для плазменной наплавки менее дорогостоящее (до 200 тыс. евро за 1 кг) по сравнению с лазерным и ЭЛС. В то же время использование проволоки, кроме ее отно-

сительно низкой цены, по сравнению с порошком дает 100%-ную эффективность использования материала (коэффициент использования для порошковых материалов составляет от 30 до 70 %). Также данный способ позволяет достичь существенно большей массовой производительности (до 10 кг/ч). Все это делает данный способ при выращивании крупных заготовок деталей (даже с учетом больших припусков на мехобработку в связи с более шероховатой поверхностью) с точки зрения экономики более перспективным.

Актуальной задачей становится сравнительная оценка структуры и механических свойств заготовок деталей из титановых сплавов, полученных выращиванием с применением плазменной наплавки проволокой в сравнении с классическими способами изготовления (литье, штамповка).

С этой целью исследовали заготовку в форме пластины размерами 360×250×8 мм (рис. 1), выращенную на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в среде аргона с применением проволоки из сплава Ti-6Al-4V диаметром 1,6 мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Согласно данным количественного спектрального анализа материал образца по содержанию легирующих элементов аналогичен отечественному сплаву ВТ6, содержание газов не превышает нормы стандарта для титановых сплавов авиационного назначения. Результаты проверки химического состава представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав образца-пластины, мас. %

Наименование	Ti	Al	V	O ₂	N ₂
Пластина	основа	5,85	4,30	0,122	0,00435
Нормы по ОСТ 190013-81 для сплава ВТ6	->-	5,3...6,8	3,5...5,3	≤0,20	≤0,05

Таблица 2. Механические свойства материала наплавленной пластины

Номер образца	Состояние образцов	Направление вырезки	σ _b , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	ψ, %
1	до термообработки	поперечное	928	808	15,2	45,4
2		948	844	7,2	15,4	
3		продольное	972	851	10,8	28,3
4		965	856	12,0	36,0	
5	после термообработки (отжиг T = 800 °C)	поперечное	913	831	17,2	54,3
6		922	848	12,0	39,8	
7		продольное	989	910	7,2	20,2
8		942	868	8,0	20,5	
Нормы* ОСТ 190024-94 (для плит из сплава ВТ6 толщиной 11...60 мм)	отожженное	-	900...1100	-	≥6,0	≥16,0

*Представлены для справки и не распространяются на наплавленные образцы.

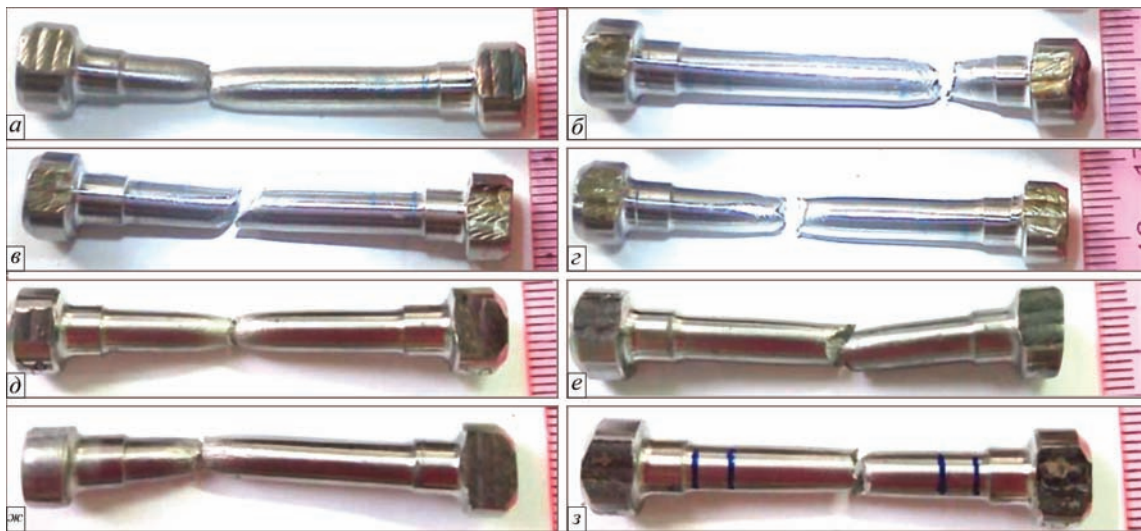


Рис. 2. Разрывные образцы после испытаний из пластины до термообработки (а — 1; б — 3; в — 2; г — 4) и после (д — 5; е — 7; ж — 6; з — 8)

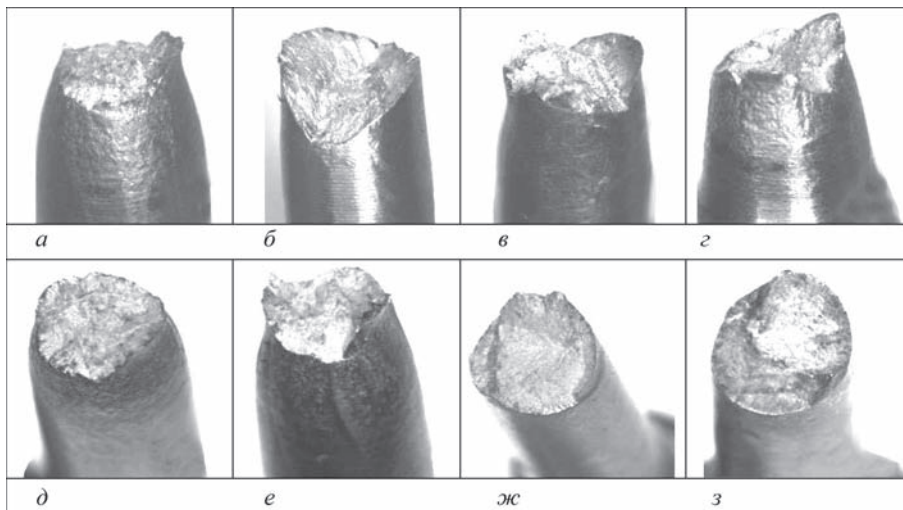


Рис. 3. Изломы образцов до термообработки (а — 1; б — 2; в — 3; г — 4) и после (д — 5; е — 6; ж — 7; з — 8), $\times 6,5$

Механические свойства проверены на стандартных разрывных образцах с рабочей частью диаметром 5 мм, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев в исходном состоянии (после наплавки), а также после термообработки по режиму, рекомендуемому для деформируемых полуфабрикатов из сплава ВТ6: отжиг ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$), охлаждение на воздухе. Значения механических характеристик представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, механические свойства вдоль и поперек пластины находятся примерно на одном уровне, анизотропии свойств не наблюдается. Отжиг наплавленной пластины позволил несколько повысить пластичность материала. При этом свойства образцов из исследуемой пластины до и после отжига соответствовали нормам для деформируемых полуфабрикатов (плит толщиной 11...60 мм по ОСТ 190024-94 «Плиты из титановых сплавов»).

Осмотр образцов после испытаний показал, что образцы 1, 3, 4, 5, 6 разрушены с образованием шейки вблизи излома, а образцы 2, 7, 8 — практи-

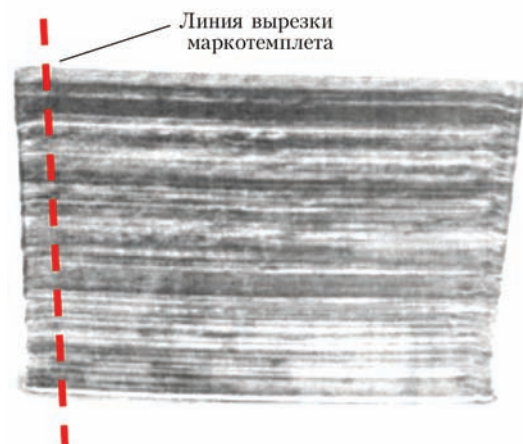


Рис. 4. Схема вырезки макротемплета из наплавленной пластины

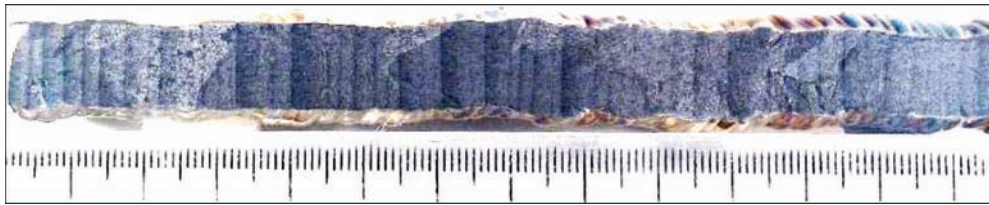


Рис. 5. Макроструктура пластины, выращенной способом плазменной наплавки (до отжига)



Рис. 6. Микроструктура пластины в исходном состоянии (после наплавки): *a* — $\times 50$; *b*, *v* — $\times 500$



Рис. 7. Микроструктура пластины после отжига: *a* — $\times 50$; *b*, *v* — $\times 500$

чески без видимой шейки, что подтверждает более низкие значения пластичности (рис. 2).

Осмотр с помощью бинокулярного микроскопа в изломах разрывных образцов дефектов метал-

лургического происхождения не выявил (рис. 3). Следует отметить, что рельеф изломов образцов с более низкой пластичностью отличался от остальных, имеющих мелкокристаллическое строение, разрушением вдоль нескольких плоскостей под углом к поверхности, по-видимому, по телу крупных зерен (см. рис. 3, б, ж, з).

Следует отметить, что поверхность исследуемых образцов в зоне разрушения характерна для деформируемых полуфабрикатов из титановых сплавов.

Макроструктуру изучали на темплете, вырезанном поперек наплавленных слоев по высоте образца (рис. 4).

Визуальный осмотр показал, что в макроструктуре образца выявляются слои наплавленного металла в виде темных полос. Дефекты металлургического происхождения (поры, пустоты, раковины, включения, неслитины) не обнаружены (рис. 5).

Макроструктура пластины отличается от стандартных деформируемых полуфабрикатов наличием линий соединения сплавленных слоев, лежащих в различных кристаллографических плоскостях, по-разному отражающих свет от плоскости травленого шлифа.

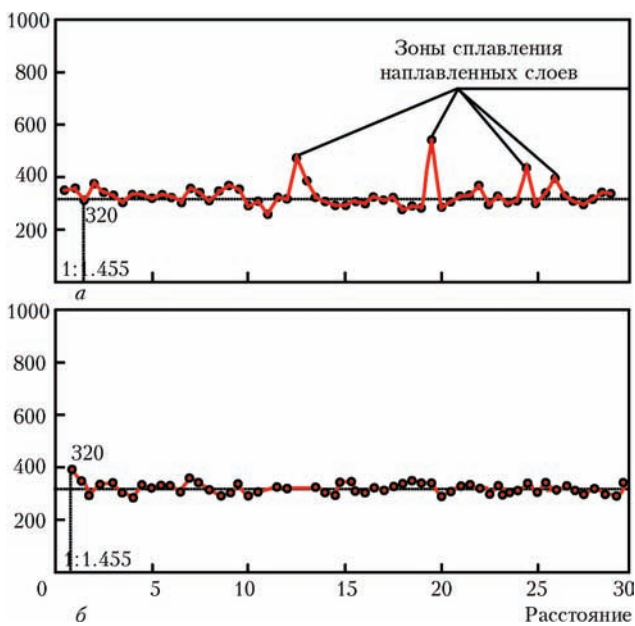


Рис. 8. Распределение микротвердости поперек наплавленных слоев пластины после: *a* — после плазменной наплавки; *b* — отжига

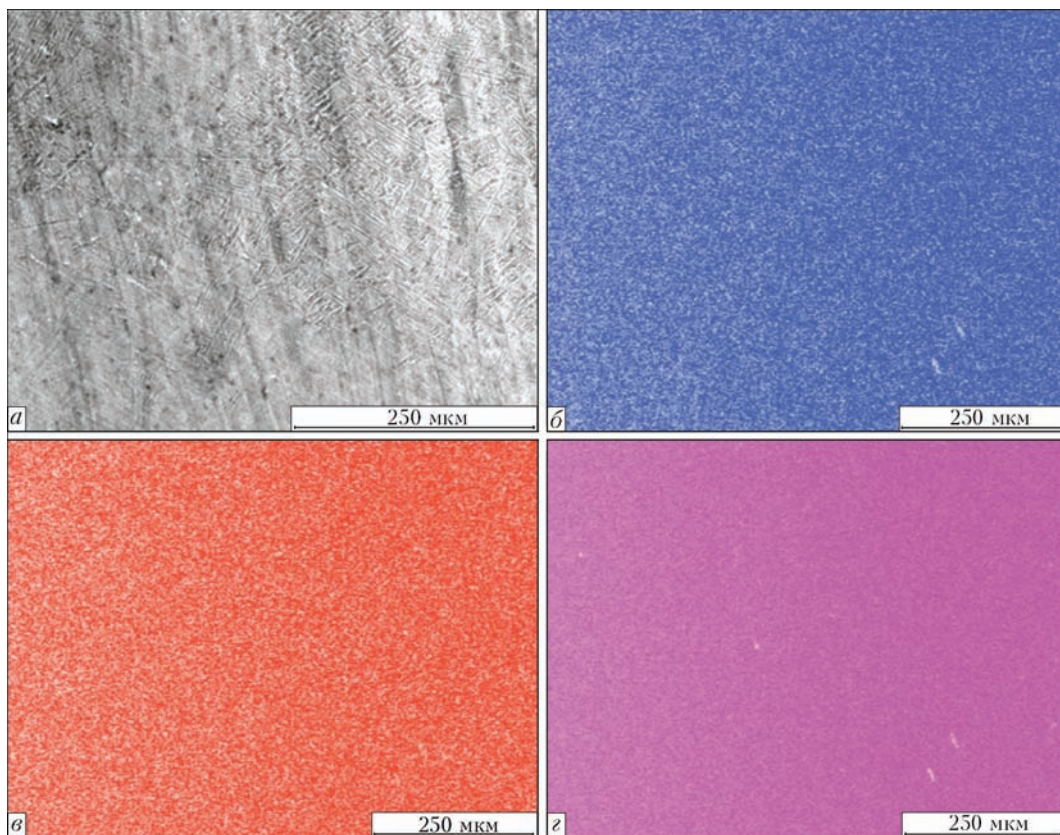
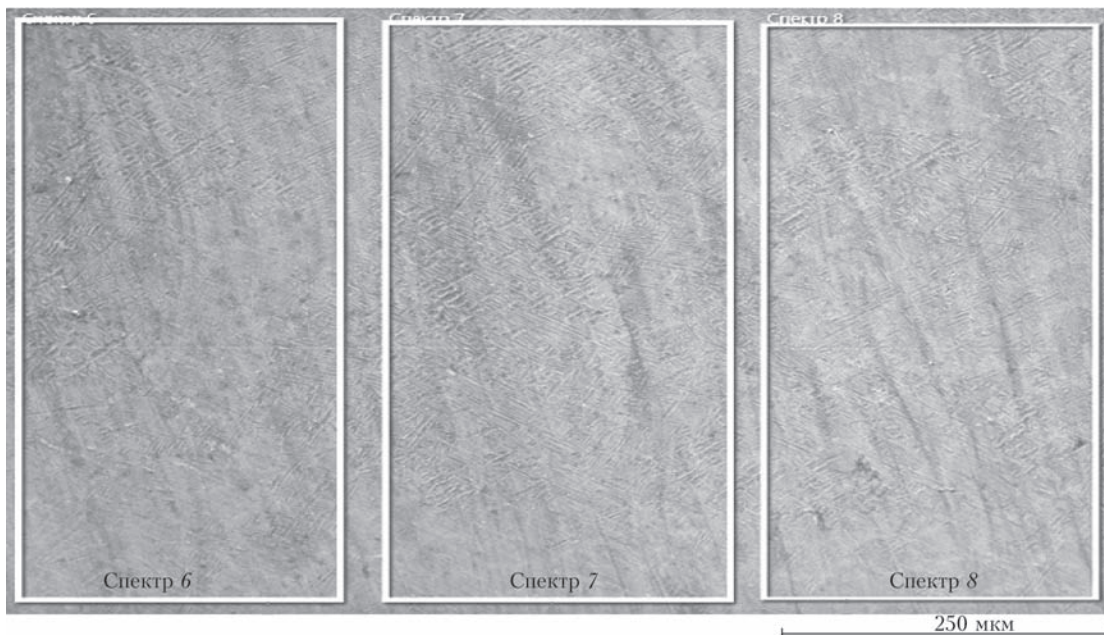


Рис. 9. Результаты РСМА в режиме карты распределения элементов по площади



Зона анализа	Элементы, мас. %		
	Al	Ti	V
Спектр 6	5,81	90,19	4,00
Спектр 7	5,74	90,15	4,11
Спектр 8	5,69	90,37	3,94

Рис. 10. Результаты РСМА фрагмента образца

Последующий микроанализ показал, что микроструктура образца в исходном состоянии (до отжига) по месту соединения наплавленных слоев и в прилегающей зоне имеет игольчатое строение (рис. 6, а, б), в остальной части структурные составляющие имеют вид пересекающихся пластин (рис. 6, а, в). После отжига при $T = 800$ °С микроструктура в месте соединения наплавленных слоев из игольчатой превратилась в тонкопластинчатую, в остальных зонах микроструктурных изменений не обнаружено (рис. 7).

Пластинчатая микроструктура является стандартной и допускается для ряда деформируемых полуфабрикатов, предназначенных для деталей статорного назначения авиационной техники (фланцы, проставки, кронштейны и др.), что позволяет рассматривать способ плазменной наплавки с использованием титановой проволоки как перспективную технологию получения заготовок в форме пластин.

Измерения микротвердости на образцах до и после термообработки проводили с шагом 0,5 мм поперек наплавленных слоев. В результате установлено, что значения микротвердости на всей длине находятся в пределах 298...347 HV, что является характерным для сплава ВТ6. При этом на образце до термообработки в зонах сплавления слоев наблюдалось повышение твердости от 420 до 548 HV (рис. 8, а), что обусловлено формированием в этой зоне закалочной структуры α' -фазы. После отжига при $T = 800$ °С, как отмечалось ранее, в микроструктуре в зоне сплавления слоев произошел распад α' -фазы на пластинчатые ($\alpha + \beta$)-фазы, что подтверждается результатами замеров микротвердости (скачков твердости не наблюдали (рис. 8, б).

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) подтвердил, что металл наплавленных слоев пластины однородный по структуре и свойствам и это можно объяснить равномерным распределением химических элементов как в зоне места соединения слоев, так и в остальном металле (рис. 9, 10).

Как видно из данных качественного и количественного РСМА содержание легирующих элементов в металле исследуемой пластины практически идентичное и равномерное между слоями, что также обусловило отсутствие анизотропии свойств и стабильный их уровень.

Выводы

1. Произведена сравнительная оценка структуры и механических свойств пластины размерами 360×250×8 мм, полученной на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в

среде аргона с применением проволоки Ti-6Al-4V диаметром 1,6 мм с классическими способами изготовления (литье, штамповка).

2. Установлено, что химический состав материала пластины по содержанию легирующих элементов аналогичен отечественному сплаву ВТ6, при этом азот и кислород не превышает нормы стандарта для титановых сплавов авиационного назначения (ОСТ 1 90013–81). Распределение элементов в металле образца равномерное.

3. Механические свойства вдоль и поперек наплавленной пластины примерно на одном уровне, анизотропия свойств не наблюдается, при этом свойства образцов до и после отжига при $T = 800$ °С соответствуют нормам для деформируемых полуфабрикатов (плит толщиной 11...60 мм по ОСТ 190024–94).

4. Дефекты металлургического происхождения (поры, пустоты, раковины, включения, неслитины) не обнаружены. Структура металла пластины имеет признаки послойного структурирования. До отжига микроструктура образца в зоне сплавления слоев имела игольчатое строение α - и β -фаз. При этом в этой зоне по сравнению с остальными выявлены скачки значений микротвердости от 420 до 548 HV, а в остальных — 298...345 HV, что косвенно говорит о наличии метастабильной α' -фазы. В остальной части структурные составляющие имели вид пересекающихся пластин.

После отжига при $T = 800$ °С микроструктура в месте соединения наплавленных слоев из игольчатой превратилась в тонкопластинчатую, в остальных зонах микроструктурных изменений не обнаружено. При этом значения микротвердости находились на одном уровне по сечению образца и не превышали 345 HV.

5. Проведенные исследования доказывают, что способ послойного формирования плазменной наплавкой с присадочной проволокой заготовок статорных деталей из титановых сплавов (двухфазных) является перспективным по прочностным и физическим критериям (на уровне деформируемых полуфабрикатов).

6. Данный способ получения заготовок деталей является экономически более эффективным по сравнению с другими АТ по следующим показателям: высокая производительность (до 10 кг/ч); низкая цена титановой проволоки (50...100 евро за 1 кг) по сравнению с порошком (400...550 евро за 1 кг); 100%-ная эффективность использования присадочного материала (коэффициент использования для порошковых материалов составляет от 30 до 70 %).

Недостаток — необходимость относительно больших припусков под мехобработку по сравнению с другими способами (лазерными и ЭЛС) в связи с получением более шероховатой поверхности и значительных короблений.

Список литературы

1. Туричин Г. А., Земляков Е. В., Климова О. Г. и др. (2015) Прямое лазерное выращивание — перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения. *Сварка и диагностика*, **3**, 54–57.
2. Жуков В. В., Григоренко Г. М., Шаповалов В. А. (2016) Аддитивное производство металлических изделий. *Автоматическая сварка*, **5–6**, 148–153.
3. Ковальчук Д. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А. (2017) Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. *Там же*, **12**, 26–29.
4. Ахонин С. В., Вржижевский Э. Л., Белоус В. Ю., Петриченко И. К. (2016) 3D электронно-лучевая наплавка титановых деталей. *Там же*, **5–6**, 141–144.

5. Джуган А. Л., Овчинников А. В., Ольшанский В. Е. (2014) Аддитивные технологии и возможности их применения в современных условиях. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 96–101.

References

1. Turichin, G.A., Zemlyakov, E.V., Klimova, O.G. et al. (2015) Direct laser growth as a prospective additive technology for aircraft engine building. *Svarka i Diagnostika*, **3**, 54–57 [in Russian].
2. Zhukov, V.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Additive manufacturing of metal products (Review). *The Patent Welding J.*, **5–6**, 148–153.
3. Kovalchuk, D.V., Melnik, V.I., Melnik, I.V., Tugaj, B.A. (2017) New possibilities of additive manufacturing using 3D Metal Printing Technology (Review). *Ibid.*, **12**, 26–29.
4. Akhonin, S.V., Vrzhezhevsky, E.L., Belous, V.Yu. et al. (2016) Electron beam 3D-deposition of titanium parts. *Ibid.*, **5–6**, 141–144.
5. Dzhugan, A.L., Ovchinnikov, A.V., Olshansky, B.E. (2014) Additive technologies and possibilities of their application in modern conditions. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 96–101 [in Russian].

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШАРОВОГО ФОРМУВАННЯ СПОСОБОМ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ВУЗЛІВ ВЕРТОЛЬОТІВ І ГТД

І. А. Петрик, С. Л. Чігілейчик, Т. А. Мітіна, Ю. А. Марченко, М. О. Гнатенко

АТ «МОТОР СІЧ». 69068, м. Запорозжя, просп. Моторобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

В роботі висвітлено перспективний спосіб виготовлення широкої номенклатури великогабаритних корпусних титанових деталей і вузлів ГТД із застосуванням технології плазмового наплавлення з присадним матеріалом (дротом). Проведено оцінку структури і механічних властивостей заготовок деталей з титанових сплавів, що отримані виробами із застосуванням плазмового наплавлення, в порівнянні з традиційними способами їх виготовлення, такими як штампування і лиття. Показана економічна ефективність даної технології в порівнянні з лазерно-порошковим способом виробування заготовок деталей. Бібліогр. 5, табл. 2, іл. 13.

Ключові слова: плазмова наплавка; дріт; виробування; титанові сплави; механічні властивості

EVALUATION OF FEASIBILITY OF APPLYING THE TECHNOLOGY OF LAYER-BY-LAYER FORMING BY METHOD OF PLASMA SURFACING OF TITANIUM ALLOY PARTS OF COMPONENTS OF HELICOPTERS AND GAS TURBINE ENGINES

I.A. Petrik, S.L. Chigilejchik, T.A. Mitina, Yu.A. Marchenko, M.O. Gnatenko

JSC «MOTOR SICH».

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

The work presents a challenging method of manufacture of a wide assortment of large-sized casing titanium parts and components of GTE by using the technology of plasma surfacing with a filler material (wire). Evaluation of structure and mechanical properties of semi-products of titanium alloy parts, produced by growing using the plasma surfacing, was evaluated in comparison with such classic methods of their manufacture as stamping and casting. The economic efficiency of the given technology is shown in comparison with a laser-powder method of growing the semi-products of parts. 5 Ref., 2 Tabl., 13 Fig.

Key words: plasma surfacing; wire; growing; titanium alloys; mechanical properties

Поступила 25.06.2018