

М. О. Гнатенко^{*,}**, аспирант, инженер-технолог,

e-mail: Jane070air594@gmail.com

Т. А. Митина^{}**, канд. техн. наук, инженер-технолог

Ю. А. Марченко^{*,}**, аспирант, ведущ. инженер

^{*}Запорожский национальный технический университет, Запорожье

^{**}АО «Мотор Сич», Запорожье

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В данной работе проведена оценка возможности изготовления и ремонта крупногабаритных корпусных деталей ГТД методом плазменной наплавки с использованием присадочного материала – проволоки. Проведен сравнительный анализ структуры, химического состава, механических свойств заготовок, полученных методом плазменной наплавки, с такими стандартными способами изготовления, как литейное производство и штамповка. Проведена оценка возможности ремонта с использованием данного метода.

Ключевые слова: плазменная наплавка, алюминиевые сплавы, выращивание, литейное производство.

У даній роботі проведено оцінку можливостей виготовлення і ремонту габаритних корпусних деталей ГТД методом плазмової наплавки з використанням присадочного матеріалу – проволки. Проведено порівняльний аналіз структури, хімічного складу, механічних властивостей заготовок, отриманих методом плазмової наплавки, з такими стандартними способами виготовлення, як ливарне виробництво і штамповка. Також проведено оцінку можливості ремонту деталей із застосуванням даного методу.

Ключові слова: плазмова наплавка, алюмінієві сплави, вирощування, ливарне виробництво.

Estimation of possibility of manufacturing and repairing of large-sized components GTE by the method of plasma surfacing using adding material – wire – is carried out in this work. A comparative analysis of the structure, the chemical composition and the mechanical properties of the billets obtained by plasma surfacing in comparison with conventional methods such as foundry and forging are performed. Estimation of possibility of repairing with use of this method is carried out.

Keywords: plasma surfacing, aluminum alloys, cultivation, foundry.

Аддитивные технологии являются новыми технологиями производства деталей из металла, которые в ряде случаев могут заменить такие классические способы, как литье и штамповка. Среди основных преимуществ данной технологии можно выделить то, что с помощью автоматизированного компьютерного управления появляется возможность послойного изготовления нового изделия по трехмерной 3D-модели. При этом значительно сокращаются время и затраты на получение нового изделия за счет исключения промежуточных стадий изготовления оснастки и пресс-форм.

Помимо этого данная технология дает возможность: минимизировать влияние «человеческого фактора»; сократить численность персонала, решить проблему нехватки квалифицированного персонала – модельщиков, формовщиков и т. д.; устранить необходимость содержания, хранения и ремонта модельной оснастки, особенно для относительно габаритных изделий [1].

Аддитивные технологии, в частности, метод плазменной наплавки, используются для трех основных направлений: изготовления готового изделия методом аддитивных технологий; ремонт: восстановления деталей после эксплуатации, а также для устранения дефектов литья, штамповки, фрезеровки; комбинированной технологии, когда часть изделия изготавливается классическими методами (литье, штамповка, фрезеровка), а далее доращивается [2].

Целью данной статьи является сравнительная оценка соответствия химических, механических свойств и структуры алюминиевых сплавов, полученных аддитивными технологиями, со свойствами материалов, полученных методом литья. Оценить возможность применения аддитивных технологий для изготовления и восстановления деталей ГТД.

Для этого было проведено исследование заготовки в форме пластины 360×250×8 мм (рис. 1), выращенной на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в среде аргона с применением проволоки ER5356 ($\varnothing_{пр.} = 1,6$ мм).

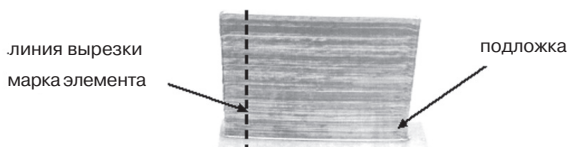


Рис. 1. Пластина, полученная методом плазменной наплавки

Проведено исследование пластин, полученных методом плазменной наплавки с использованием присадочного материала – проволоки из сплава AlMg5 (ER5356).

Выбор материала обусловлен тем, что порошки из алюминиевых сплавов пока не обладают необходимыми свойствами, не отличаются стабильным качеством, и имеют более высокую стоимость (порошки – 400–550 € за 1 кг, проволока – 50–100 € за 1 кг).

Выбор источника нагрева – плазмы, обусловлен тем, что оборудование для плазменной наплавки менее дорогостоящее (до 200 тыс. €) по сравнению с лазерным и ЭЛС. В то же время использование проволоки, кроме ее относительно 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 в час). Все это делает данный способ при выращивании крупных заготовок деталей (даже с учетом больших припусков на механическую обработку в связи с более шероховатой поверхностью) с точки зрения экономики более эффективным.

Согласно данным количественного спектрального анализа, химический состав образца соответствовал требованиям AWSA5.10 для сплава AlMg5(ER5356) и близок к составу сплава AMг5 по ГОСТ 4784-74. Результаты проверки представлены в табл. 1.

Механические свойства проверены на разрывных образцах, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев в исходном состоянии (после наплавки).

Таблица 1
Химический состав образцов, полученных методом наплавки

Наименование продукции	Химический состав, %			
	Si	Fe	Mn	Mg
Образец	0,05	0,08	0,1	4,75
Нормы AWS A5.10 для сплава AlMg5(ER5356)	≥0,25	≥0,4	0,05-0,20	4,5-5,5
Нормы ГОСТ 4784-74 для сплава AMг5	≥ 0,5	≥ 0,5	0,3–0,8	4,8–5,8

Значения механических характеристик представлены в табл. 2 для справки и не распространяются на наплавленные образцы.

Как видно из данных табл. 2, прочность образцов, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев, находятся примерно на одном уровне. Более низкие значения

Таблица 2

Значения механических характеристик образцов, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев, в исходном состоянии

Номер образца	Направление вырезки	Механические свойства			
		$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %
1	поперечное	26,3	13,9	17,6	21,4
2		27,7	14,8	19,2	19,3
3	продольное	28,5	14,9	30,0	43,9
4		28,3	15,4	30,4	42,2
Нормы ГОСТ 17232-99 (для плит из Al– сплавов толщиной 11–25 мм)	—	≥27,0	≥12,0	≥13,0	—

прочности и удлинения образца № 1 можно объяснить наличием скопления микропор в изломе данного образца (рис. 2).

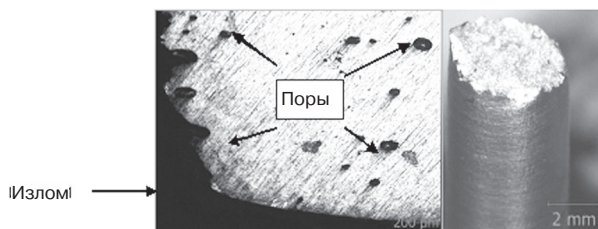


Рис. 2. Микрошлиф с выходом на излом у образца № 1

Следует отметить, что механические свойства исследуемого образца в основном соответствуют нормам ГОСТ 17232-99 на деформированные плиты из сплава АМг5.

Осмотром с помощью бинокулярного микроскопа в изломах разрывных образцов обнаружены дефекты металлургического происхождения в виде микропор, изломы светлые, мелкокристаллические.

Предел текучести сплава-аналога АМг5, полученного методом наплавки, выше остальных аналогов из алюминиевых сплавов, имеет равные характеристики со сплавами АМг5 и АМг6.

АМг5, полученный методом наплавки, имеет наибольшие показатели предела текучести и относительного удлинения.

Визуальный осмотр показал, что макроструктура наплавленного образца имеет однородный матовый фон травимости, без проявления макрозерна и линий соединения наплавленных слоев; следует отметить, что в структуре образца по всему сечению имеют место мелкие поры округлой формы $\varnothing 60\text{--}90\text{ мкм}$ (рис. 3).

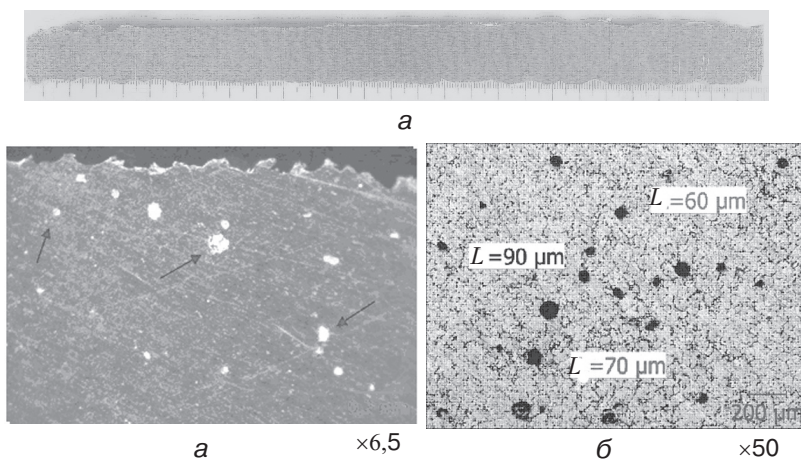


Рис. 3. Макроструктура наплавленного образца

Микроструктура наплавленного образца неоднородна по сечению – на поверхности образца по линии сплавления слоев металла, характерна для перегретого состояния, перегретый слой залегает на глубину ~1,0 мм (рис. 4, а), далее по сечению образца – состоит из более дисперсных выделений упрочняющих фаз в α -твердом растворе, характерна для сплавов типа АМг, перегрева нет (рис. 4. б).

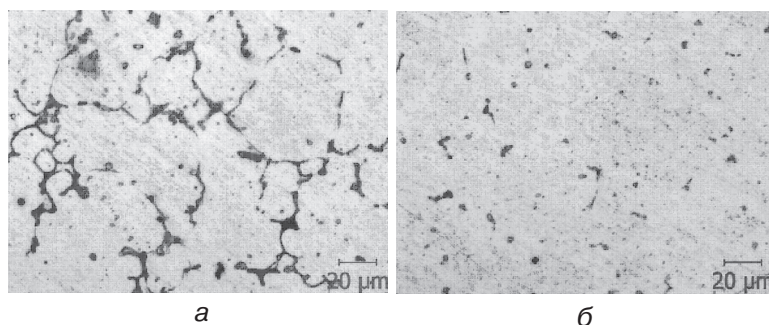


Рис. 4. Микроструктура образца, $\times 500$

Механические свойства алюминиевых сплавов, используемых на АО «Мотор Сич» для изготовления корпусных деталей, приведены в табл. 3

Таблица 3
Механические свойства алюминиевых сплавов,
используемых на АО «Мотор Сич»

Сплав	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Удлинение, %	Поперечное сужение, %
АМг3	165–185	59–69	11–12	–
АМг5	255–265	110–120	12–13	–
АМг6	275–305	130–145	4–11	–
АМц	110–120	60–120	12–15	–
АЛ5	250	180	1	–
АЛ9	230	140	4	–
АК12	147–157		2–3	–
АМГ5 Плазменная наплавка	263–285	139–154	17,6–30,4	19,3–43,9

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) показал, что в материале образца имеются концентрационные неоднородности содержания железа, магния, марганца, обнаруженные по месту выделения упрочняющих фаз, что характерно для данного сплава в деформируемом состоянии (рис. 5). Результаты РСМА приведены в табл. 4.

Выводы

- Произведена оценка структуры и механических свойств заготовки (пластины 360×250×8 мм), выращенной на установке для плазменной наплавки портального типа фирмы SBI в среде аргона с применением проволоки ER5356 ($\varnothing_{пр.} = 1,6$ мм), в сравнении с традиционными способами изготовления (литье, штамповка).

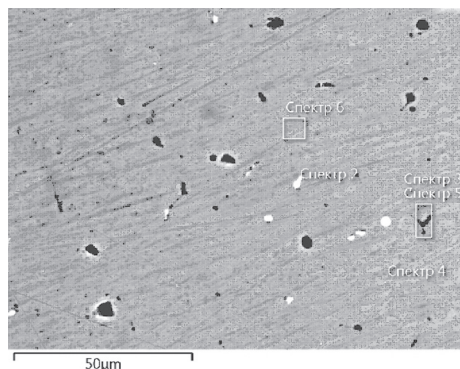


Рис. 5. Результаты РСМА фрагмента образца

Установлено:

– химический состав образца, изготовленный на фирме «SBI» методом плазменной наплавки, соответствует требованиям AWSA5.10 для сплава AlMg5(ER5356) и близок к составу сплава AMg5 по ГОСТ 4784-74. РСМА показал, что в материале образца имеются концентрационные неоднородности содержания железа, магния, марганца по месту выделения упрочняющих фаз, присущие сплавам типа AMг;

– механические свойства образцов, вырезанных вдоль и поперек наплавленных слоев, находятся примерно на одном уровне. Механические свойства металла образца до отжига, в основном, соответствуют нормам

ГОСТ 17232-99 на деформированные плиты из сплава AMг5, после отжига – не соответствуют по значениям прочности (σ_B) и пластичности (δ);

Таблица 4

Результаты РСМА

Зона анализа	Элемент, %вес.				
	Mg	Al	Si	Mn	Fe
Спектр 2	5,19	93,0	0,05	0,22	1,53
Спектр 3	4,72	95,03	0	0,16	0,09
Спектр 4	2,55	97,25	0	0,11	0,09
Спектр 5	9,81	90,08	0	0,10	0
Спектр 6	2,94	96,89	0	0,13	0,04

– макроструктура наплавленного образца имеет однородный матовый фон, без проявления макрозерна и линий соединения наплавленных слоев; следует отметить, что в структуре образца по всему сечению имеют место мелкие поры округлой формы $\varnothing$ 60–90 мкм;

– микроструктура наплавленного образца неоднородна по сечению – на поверхности образца по линии сплавления слоев металла, характерна для перегретого состояния, перегретый слой залегает на глубину $\sim 1,0$ мм, далее по сечению образца – состоит из более дисперсных выделений упрочняющих фаз в α -твердом растворе, характерна для сплавов типа AMг. Микроструктурных изменений в материале образцов после отжига не обнаружено.

• Проведенные исследования доказывают, что метод послойного выращивания плазменной наплавкой с присадочной проволокой заготовок статорных деталей из алюминиевых сплавов (двухфазных) является перспективным по прочностным и физическим критериям (на уровне деформируемых полуфабрикатов).

• Также данный метод при выращивании заготовок деталей является экономически более эффективным по сравнению с другими способами аддитивных технологий: высокая производительность (до 10 кг в час); 100%-ная эффективность использования присадочного материала (коэффициент использования для порошковых материалов составляет от 30 до 70 %).

По результатам исследований можно сделать вывод, что метод плазменного выращивания применим при изготовлении и ремонте крупногабаритных деталей, таких как кронштейны, крышки, корпусные детали, кольца, кожуха.



Список литературы

1. Автоматизация в промышленности: Аддитивное производство 3D-компонентов с качеством готовой детали. Уникальное сочетание технологий. Оборудование и инструмент для профессионалов [Электронный ресурс]:URL: [https://avtprom.ru/news/2016/05/26/additivnoe-proizvodstvo\(2016\)](https://avtprom.ru/news/2016/05/26/additivnoe-proizvodstvo(2016)).
2. Аnamova P. P. Автоматизация подготовки аддитивного производства изделий авиационной техники / P.P Аманова // МАИ. – 2015. – № 82.



References

1. Additivnoe proizvodstvo 3D-komponentov s kachestvom gotovoy detali. Unikalnoe sochetanie tehnologiy, Oborudovanie i instrument dlya professionalov [*Additive production of 3D components with the quality of finished part. A unique combination of technologies equipment and tools for professionals*]. URL: www.avtprom.ru/news/2016/05/26/additivnoe-proizvodstvo. (2016) [in Russian].
2. Anamova, R.R. (2015) Avtomatizatsiya podgotovki additivnogo proizvodstva izdeliy aviatsionnoy tehniki [*Automation of the preparation of additive production of aviation equipment. Trans. from Eng.*]. Trudy MAI, No. 82. [in Russian].

Поступила 03.07.2018