

АНОТАЦІЯ

Гнатенко М.О. – «Удосконалення мікрOMETалургійних методів при отриманні авіаційних деталей з алюмінієвих сплавів» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – металургія.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» МОН України, Запоріжжя, 2021 р.

Зміст дисертації. Дисертація присвячена дослідженню впливу дугових методів наплавлення на склад, структуру, фізичні властивості металів алюмінієвих сплавів. Метою є визначення найбільш оптимального методу отримання авіаційних деталей з алюмінієвих сплавів та подальшого вдосконалення технології обраного методу наплавлення. Вплив на структуру і властивості наплавленого металу проходив шляхом корегування основних параметрів процесу наплавлення, таких як склад захисного газу та значень погонної енергії. За результатами комплексу наукових досліджень проведено апробацію удосконаленого методу у виробничих умовах підприємства АТ «Мотор Січ», при отриманні заготовки корпусної деталі складної геометричної форми.

Вперше проведено порівняльний аналіз та встановлено закономірності впливу технологічних параметрів мікрOMETалургійних методів пошарового наплавлення дротом з використанням методу холодного пернесення металу, мікроплазмового, електродугового методів наплавлення, на хімічний склад, структуру і механічні властивості сплавів AlSi5, AlMg5. Найвищі механічні властивості сплаву AlMg5 дозволяє отримувати мікроплазмовий метод наплавлення ($\sigma_b = 274 \pm 5$ МПа; $\sigma_{0,2} = 154 \pm 5$ МПа; $\delta = 30,4 \pm 5\%$). Для сплаву AlSi5 найвищі значення міцності і плинності досягаються методом холодного пернесення металу ($\sigma_b = 190 \pm 5$ МПа; $\sigma_{0,2} = 120 \pm 5$ МПа; $\delta = 16 \pm 5\%$). Однак

кожен з трьох методів дозволяє отримувати хімічний склад і механічні властивості матеріалу в межах ТУ для даних сплавів.

Отримали подальший розвиток уявлення про механізми впливу технологічних факторів на властивості алюмінієвих сплавів AlSi5, AlMg5, які дозволяють при мінімальних значеннях погонної енергії (35 кг/Дж), методом електродугового наплавлення, забезпечити механічні властивості алюмінієвих сплавів у межах вимог встановлених відповідними стандартами, що дає можливість формувати тонкі стінки (до 3 мм) сегментів деталей, без витрат запасу міцності.

Вперше показано вплив захисної суміші на технологічний процес електродугового наплавлення. Встановлено, що підвищення кількості гелію у складі аргону дозволяє, знизити мінімальне значення погонної енергії необхідне для розплавлення металу та отримання якісної структури металу. Для отримання якісної структури металу, оптимальним є склад захисної суміші аргон-гелій у співвідношенні 70/30%.

Отримані нові уявлення про розвиток мікрометалургійних процесів наплавлення силумінів і алюмомагнієвих сплавів при впливі погонної енергії на структурну складову алюмінієвих сплавів. Підвищення значень погонної енергії до 80 Дж/мм дозволяє отримувати більш закруглену і дрібну структуру і забезпечує зменшення відстані між гілками α -дендритів кремнію до 5–15 мкм, для сплаву AlSi5, в порівнянні з литими аналогами. Для сплаву AlMg5 збільшення погонної енергії дозволяє отримувати рівномірно розподілену структуру з підвищеною кількістю зміцнюючої фаз магнію в порівнянні з аналогом, отриманим методом гарячого штампування.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та одного додатку.

У першому розділі представлено аналіз сучасної літератури з питань отримання нових відповідальних деталей з алюмінієвих сплавів традиційними методами та методами наплавлення. Показано, що для підвищення якості деталей доцільно використовувати технології

наплавлення, для впровадження даних технологій доцільно проводити дослідження спрямовані на оптимізацію технологічних режимів і підвищення якості виробів.

На основі літературних даних та проведеного аналізу сучасного стану питання сформульовано мету дослідження та задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

У другому розділі обґрунтовано вибір технології, матеріалів та методик досліджень. Дослідження хімічного складу визначалися рентген-флуоресцентним та рентгеноспектральним методами аналізу, дослідження структури проводилося за допомогою оптичної та електронної металографії. Дослідження фізико-механічних властивостей встановлювали за допомогою розривних машин. Результати аналізу отриманих результатів оброблялись статистичними методами обробки експериментальних даних та методами січних кривих.

У третьому розділі було проведено аналіз трьох методів наплавлення: електродугового, плазмового та методу холодного перенесення металу з метою визначення найбільш оптимального методу для застосування у виробничих умовах при отриманні деталей з алюмінієвих сплавів. Кожним з досліджуваних методів були наплавлені зразки з алюмо-кремнієвого сплаву AlSi5, та алюмо-магнієвого сплаву AlMg5. Був проведений аналіз методів наплавлення за такими параметрами як продуктивність технології та властивостями отриманих металів алюмінієвих сплавів, такими як: геометрія поверхні, хімічний склад, структура і фізико-механічні властивості.

В ході досліджень встановлено, що кожний з методів дозволяє отримувати властивості матеріалів у межах вимог відповідних стандартів. Однак найефективнішим для застосування у промислових умовах є метод електродугового наплавлення, оскільки він забезпечує найякіснішу геометрію і має найвищу продуктивність.

У четвертому розділі було проведено вдосконалення технології електродугового багат шарового наплавлення шляхом корегування складу

захисної суміші та значень погонної енергії. До аргону додавали гелій у співвідношеннях від 10% до 50% із кроком 10%. Отримані графічні закономірності вмісту гелію та значень необхідною погонної енергії. Виявлено, що зі збільшенням кількості гелію збільшується концентрація дуги та зменшується сила струму необхідна для розплавлення металу. Було встановлено наступні закономірності що, збільшення значень погонної енергії забезпечує якісніше формування структури, для обох сплавів – для AlSi5 знижує відстань між гілками дендритів, для AlMg5 – дозволяє збільшити кількість включень, та підвищити рівномірність їх розподілу. Якісніше формування структури забезпечує вищий рівень властивостей, а додавання гелію дозволяє знизити кількість погонної енергії необхідної для отримання вищих механічних властивостей.

П'ятий розділ присвячено апробації вдосконаленої технології на прикладі деталі «кришка редуктора». Проведено розрахунок напружено-деформованого стану наплавленої деталі та встановлено, що коефіцієнти запасу статичної міцності кришки, виготовленої з AlSi5, AlMg5, задовольняють нормативним вимогам. Коефіцієнти запасу міцності для сплавів AlSi5 і AlMg5 дорівнюють 2,6 і 3,4 відповідно. Реальні навантаження, які виникають в деталі не перевищують 1200 Н. Це дозволяє стверджувати, що виріб зі сплаву AlMg5, виготовлений методом пошарового наплавлення може застосовуватися на заміну раніше використовуваних виробів з аналогічних алюмінієвих сплавів, які виготовлялися за стандартними технологіями литва.

Затрати часу при отриманні нової деталі вдосконаленим методом займає до трьох днів з моменту отримання конструкторського завдання.

Коефіцієнт використання матеріалу при наплавленні складає 89%, а при литому виготовленні виробу 33%.

В результаті роботи було вдосконалено мікрOMETалургійну технологію методу електродугового наплавлення авіаційних деталей з конструкційних алюмінієвих сплавів AlSi5 та AlMg5 із забезпеченням експлуатаційних

властивостей, на етапі конструкторсько-дослідних робіт та при одиничному виробництві.

Ключові слова: пошарове наплавлення, алюмінієві сплави, мікрометалургійні методи, вдосконалення технології.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Публікації в іноземних виданнях

1. M. Gnatenko, P. Zhemaniuk, I.Petrik, S. Sakhno, S. Chigileichik, V. Naumyk, O. Ovchinnikov, M. Matkovska Detecting the influence of heats sources on material properties when prodaction a aviation parts by a directenergy deposition method. *Eastern–european journal of enterprise technologies*. 2019. 1/12(97). P. 49 – 54.

2. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68 – 74.

Публікації у наукових фахових виданнях України

3. Гнатенко М.О. Марченко Ю.А. Митина Т.И. Оценка возможности изготовления и ремонта деталей методом аддитивных технологий из алюминиевых сплавов. *Процессы литья*. 2018. №4 (130). С.56 – 61.

4. И.А Петрик, А.В. Овчинников, М.О. Гнатенко и др. Оценка возможности применения технологи послойного формирования способом плазменной наплавки деталей из титановых сплавов узлов вертолетов ГТД. *Титан 2018 Производство и применение в Украине*. 2018 С. 114 – 116.

5. Гнатенко М.О. Виявлення впливу джерел нагріву і захисних газів на властивості матеріалу під час виготовлення авіаційних деталей методом прямого вирощування. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. №3(86) С. 33 – 36.

6. Гнатенко М.О., Наумик В.В. Прочностной расчет авиационной детали крышки редуктора, полученный методом адитивного выращивания. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. №1. 2019. С. 74 – 78.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій

7. Гнатенко М.О. и др. Изготовление литейной оснастки для лиття по выплавляемым моделям с применением аддитивных технологий. *Тезисы докладов X Международные молодежные научно–технические чтения А.Ф. Можайского* №1. 2017. С.110 – 112.

8. Гнатенко М.О. и др. Оценка возможности изготовления авиационных деталей методом плазменной наплавки из алюминиевых сплавов. *Тезисы докладов XI Международные молодежные научно–технические чтения А.Ф. Можайского* №1. 2018. С. 62 – 63.

9. Гнатенко М.О. и др. Оценка возможности изготовления авиационных деталей из алюминиевых сплавов методом плазменной наплавки. *Тезисы докладов X Міжнародна науково–технічна конференція №1 Нові матеріали і технології в машинобудуванні 2018*. №1 2018. С. 44-45

10. Гнатенко М.О. и др. Влияние методов адитивного выращивания на свойства материала при изготовлении авиационных деталей. *Тезисы докладов XII Международные молодежные научно–технические чтения А.Ф. Можайского* №1 2019 С. 128 – 129.

SYNOPSIS

Gnatenko M.O. – IMPROVEMENT OF MICROMETALLURGICAL METHODS IN MANUFACTURING AIRCRAFT COMPONENTS FROM ALUMINUM ALLOYS – Qualifying work as a manuscript.

A thesis for PhD's degree in Metallurgy (136).

The work was completed in Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, in 2021.

Scope of Thesis. The thesis is dedicated to studying impact of weld deposition techniques on composition, structure, physical properties of aluminum alloys. The work is aimed at determining the most suitable method for aircraft component manufacturing from aluminum alloys and subsequent improvement of manufacturing process of the selected weld deposition method. Impact on structure and properties of the deposited metal was studied by adjusting basic parameters of weld deposition, such as shielding gas composition and heat input values. Based on the results of a set of research the improved method was tried and tested during manufacturing of a complex box-type workpiece at Motor Sich JSC facilities.

Comparative analysis was performed for the first time and patterns of process parameter influence on chemical composition, structure and mechanical properties of AlSi5, AlMg5 alloys were specified for micrometallurgical methods of multilayer wire welding using cold metal transfer, microplasma and electric arc weld deposition. The best mechanical properties of AlMg5 alloy can be obtained by microplasma weld deposition ($\sigma_b = 274 \pm 5 \text{ MPa}$; $\sigma_{0.2} = 154 \pm 5 \text{ MPa}$; $\delta = 30.4 \pm 5\%$). For AlSi5 alloy the highest strength and yield stress values are obtained by cold metal transfer ($\sigma_b = 190 \pm 5 \text{ MPa}$; $\sigma_{0.2} = 120 \pm 5 \text{ MPa}$; $\delta = 16 \pm 5\%$). However, each of three methods allows to obtain chemical composition and mechanical properties within Specs for given alloys.

Description was further developed for mechanisms of process factor influence on AlSi5, AlMg5 alloys which allow to ensure mechanical properties of

aluminum alloys within requirements specified by relevant standards, under minimum values of heat input (35 kg/J), using arc weld deposition method, which in its turn, makes it possible to form thin walls (up to 3 mm) of the part segments without consumption of strength margin.

Shielding mixture effect on arc weld deposition process was described for the first time. It was established that helium content increase in argon allows to reduce a minimum value of heat input required for metal melting and obtaining high quality metal structure. To obtain high quality metal structure the most suitable argon to helium ratio of shielding mixture is 70:30 %.

New ideas were gained on development of micrometallurgical processes in silumin and aluminum-magnesium alloy weld deposition with heat input affecting structural component of aluminum alloys. Heat input value increase up to 80 J/mm allows to obtain more curved and fine structure and ensures decrease in distance between silicon α -dendrite branches up to 5 to 15 μm for AlSi5 alloy compared to cast equivalents. For AlMg5 alloy, heat input increase allows to obtain a uniformly distributed structure with the increased quantity of magnesium strengthening phases compared to equivalent obtained by drop stamping.

The thesis is composed of five chapters, a reference list and an appendix.

The first chapter contains analysis of modern publications on issues related to manufacturing new critical parts from aluminum alloys using conventional methods and weld deposition techniques. It is shown that to improve quality of parts it is reasonable to use weld deposition techniques; in order to implement these manufacturing processes, it is practicable to do studies aimed at optimization of process conditions and improvement of product quality.

Based on information contained in publications and analysis of the state-of-the-art, a research objective and tasks to be completed to achieve the objective, were shaped.

A choice of manufacturing process, materials and research techniques was substantiated in the second chapter. Chemical composition studies were determined by X-ray fluorescent and X-ray spectral analysis methods; structure

was studied by means of optical and electronic metallography. Physical and mechanical properties were studied using pull test machines. The obtained results were processed by statistical methods used for experimental data and by secant methods.

The third chapter describes analysis of three weld deposition methods electric arc, plasma and cold metal transfer to determine the most suitable method to be applied in production environment when manufacturing parts from aluminum-silicon alloys. Each of the studied weld deposition methods was used to manufacture specimens from AlSi5 aluminum-silicon and AlMg5 aluminum-magnesium alloys. Weld deposition methods were analyzed according to such parameters as process efficiency and the obtained aluminum alloy properties: surface geometry, chemical composition, structure and physical and chemical properties. In the course of studies it was established that each of the method allows to obtain material properties within relevant specifications. However, the most efficient for application in production environment is arc weld deposition, as it ensures the highest quality of geometry and has the best production performance.

The fourth chapter describes improvement of manufacturing process for arc multilayer weld deposition by means of adjusting shielding mixture composition and heat input values. Helium was added to argon at the ratios from 10 to 50% in 10% increment. Helium content and required heat input dependency graphs were obtained. It was found that with the increase in helium content the arc becomes more concentrated, and current strength, needed for metal melting, is reduced. The following dependencies were established: increase in heat input values ensures better structure forming for both alloys; for AlSi5 it reduces distance between dendrite branches, for AlMg5 it allows to increase number of inclusions and improve uniformity of their distribution. Better structure forming ensures better properties, and helium adding allows to reduce heat input required to obtain better mechanical properties.

The fifth chapter is dedicated to trying and testing the improved manufacturing process using the example of gearbox cover. Stress-strain state of

the weld deposited part was calculated and it was established that static strength margin coefficients for the cover made from AlSi5, AlMg5 comply with standard requirements. Strength margin coefficients for AlSi5 and AlMg5 alloys are equal to 2,6 and 3,4 respectively. Actual loads which occur in a part do not exceed 1200 N. This allows to state that the products made of AlMg5 alloy by multilayer weld deposit can be used instead of those made from identical aluminum alloys by conventional casting technologies.

Production time for a new part, manufactured by the improved method, makes up to three days from the date of receiving designer's assignment.

Material ratio makes 89% for weld deposition method and 33% for casting product manufacturing method.

The performed work resulted in improvement of micrometallurgical method of arc weld deposition on aircraft parts made of AlSi5 and AlMg5 structural aluminum alloys with the retained performance properties both at research and design stage and during piece production.

Key words: multilayer weld deposition, aluminum alloys, micrometallurgical methods, manufacturing process improvement.

THESIS RELATED REFERENCE LIST:

Publications in Foreign Press

1. M. Gnatenko, P. Zhemaniuk I. Petrik Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a directen ergy deposition method. *Eastern–european journal of enterprise technologies*. 2019. 1/12(97) P.49 – 54.

2. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68 – 74.

Publications in the Ukrainian Scientific Dedicated Journals

3. Gnatenko M.O. Marchenko Y.A. Mitina T.I. Otsenka vozmozhnosti izgotovleniya i remonta detalyei metodom additivnykh tekhnologiy iz aluminiyevykh splavov. *Protsessy litiya*. 2018. №4 (130). P.56 – 61.

4. I.A Petrik, A.V. Ovchinnikov, M.O. Gnatenko, etc. Otsenka vozmozhnosti primenyeniya tekhnologiyi posloynogo fromirovaniya sposobom plazmennoy naplavki detalyei iz titanovykh splavov uzlov vertolyotov GTD. *Titan 2018 Proizvodstvo i primenyeniye v Ukrainye*. 2018 P. 114 – 116.

5. Gnatenko M.O. Vyivlennya vplyvu dzherel nagrivu I zakhysnykh gaziv na vlastyvosti material pid chas vygotovlennya aviatsiynykh detaley metodom pryamogo vyroschuvannya. *MMetaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. 2019. №3(86) P. 33 – 36.

6. Gnatenko M.O., Naumik V.V. Prochnostnoy raschet aviatsionnoy detail kryshki reduktora, poluchennyi metodom additivnogo vyraschivaniya. *Novi materialy i tekhnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni*. №1. 2019. P. 74 – 78.

Publications in Collections of Conference Materials

7. Gnatenko M.O. etc. Izgotovlyeniye liteynoy osnastki dlya litya po vyplavlyayemim modelyam s primenyeniem additivnykh tekhnologiy *Tezisy dokladov X Mezhdunarodnye molodezhnyie nauchno-tekhnicheskie chteniya im. A.F.Mozhaiskogo* №1. 2017. P.110 – 112.

8. Gnatenko M.O. etc. Otsenka vozmozhnosti izgotovlyeniya aviatsionnykh detalyei metodom plazmennoy naplavki iz aluminiyevykh splavov *Tezisy dokladov XI Mezhdunarodnye molodezhnyie nauchno-tekhnicheskie chteniya im. A.F.Mozhaiskogo* №1. 2018. P. 62 – 63.

9. Gnatenko M.O. etc. Otsenka vozmozhnosti izgotovlyeniya aviatsionnykh detalyei iz aluminiyevykh splavov metodom plazmennoy naplavki *Tezisy dokladov X Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya №1 HNovi materialy I tekhnologiyi v mashinobuduvanni* 2018. №1 2018. P. 44-45

10. Gnatenko M.O., etc. Vliyaniye metodov additivnogo vyraschivaniya na svoystva materiala pri izgotovleniyi aviatsionnykh detalyei *Tezisy dokladov XII Mezhdunarodnye molodezhnyie nauchno-tekhnicheskie chteniya im. A.F.Mozhaiskogo* №1 2019 P. 128 – 129.