

УДК 669.71:621.791.92:621.431

- Гнатенко М.О.** Аспирант кафедры машин и технологий литейного производства, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: jane070air594@gmail.com;
- Наумик В.В.** Доктор технических наук кафедры машин и технологий литейного производства, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина;
- Матковская М.В.** Аспирант кафедры машин и технологий литейного производства, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВИАЦИОННОЙ ДЕТАЛИ КРЫШКИ РЕДУКТОРА АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ

Исследования проводились с целью обеспечить механические, технологические и эксплуатационные свойства деталей из конструкционных алюминиевых сплавов (AlSi5, AlMg5) авиационного назначения, выращенных аддитивным методом с использованием проволоки (WAAM). Для выполнения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи: получить заготовки серийных деталей с необходимой геометрией, эксплуатационными и технологическими свойствами и выполнить расчет напряженно-деформируемого состояния полученных заготовок детали. Выращивание заготовки детали производилось с помощью сварочного аппарата инвертора Fronius MagicWave 1700 и робота FANUC. Кратковременные жаропрочные испытания проводили согласно ГОСТ 25.601-80 на машине АИМА-5-2. Прочностной расчет напряженно-деформируемого состояния проводился с использованием лицензионной версии программного комплекса ANSYS 18.1. Для разработки конечно-элементной модели принят, имеющий форму тетраэдра, элемент SOLID 185. Результат проведения расчета напряженно-деформируемого состояния показал, что коэффициент запаса прочности для сплава AlSi5 и AlMg5 равен 2,6 и 3,4 соответственно. Для сплава МЛ10 – 4,0. При этом, прочностные характеристики сплавов AlMg5 и МЛ10 находятся на одном уровне. Это позволяет утверждать, что изделие из сплава AlMg5, изготовленное аддитивными технологиями может применяться взамен ранее применяемых изделий из сплава МЛ10, которые изготавливались по стандартным технологиям литья.

Ключевые слова: аддитивные технологии, аддитивное выращивание, алюминиевые сплавы, авиационные детали, WAAM (Welding + arc additive manufacturing).

Введение

В настоящее время не вызывает сомнений целесообразность применения аддитивного производства (АП) в авиастроении. АП является новым направлением изготовления деталей, в том числе и из алюминиевых сплавов, которые в ряде случаев могут заменить классические способы, такие как литье и штамповку. Поскольку данные технологии позволяют значительно сокращать время и затраты на получение нового изделия за счет исключения промежуточных стадий изготовления оснастки и пресс-форм. [1].

1. Анализ предыдущих исследований

Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) - это перспективная технология АП, позволяющая получать готовые изделия с минимальным

припуском на обработку в кратчайшие сроки путем послойного нанесения материала до достижения конечной формы. Процессы подачи проволоки имеют большую производительность и являются более экономичными из-за 100% эффективности использования проволоки по сравнению с порошковыми материалами [2]. Большинство современных исследований WAAM сосредоточены на титане и стали [3]. Алюминиевые сплавы, особенно высокопрочные, становятся все более востребованными в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность и транспорт. В связи с чем необходимы исследования и разработка технологии WAAM для алюминия. Кранфилдский университет начал применять технологию WAAM из алюминия, и были построены крупногабаритные функциональные компоненты ребер и конусов из алюминиевого сплава. [4]

© М.О. Гнатенко, В.В. Наумик, М.В. Матковская, 2019

В работе [4] были приведены изделия, выращенные методом WAAM, однако данные детали получены с использованием в качестве присадочных материалов проволок из импортных сплавов, которые по химическому составу и свойствам имеют отличия от отечественных материалов. При применении WAAM технологий в отечественном авиационном производстве так же используются импортные присадочные материалы, в связи с чем остаются нерешенными проблемы, связанные с работой в одних сборочных узлах деталей, полученных традиционными методами из отечественных сплавов и деталей, выращенных методами WAAM с использованием импортных материалов.

Коэффициент запаса прочности – это сила, деленная на прочность поперечного сечения.

В связи с чем является необходимым проведение прочностного расчета выращенных изделий.

2. Методика проведения исследований напряженно-деформируемого состояния (НДС)

Расчет НДС выращенной детали выполнен методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS 18.1. Определение НДС состоит из следующих этапов. Подготовка свойств материалов крышки для расчета НДС. Необходимые для расчета НДС свойства сплава МЛ10 крышки приняты по справочнику ВИАМ. Необходимые для расчета НДС свойства материалов крышки AlSi5 и AlMg5 были получены в результате проведения кратковременных жаропрочных испытаний при $T=150$ (рабочей температуре изделия из данного материала). Кратковременные жаропрочные испытания проводили согласно ГОСТ 25.601-80 на машине АИМА-5-2. Разработку конечно-элементной модели крышки осуществили путем генерации сетки конечных элементов с помощью препроцессора автоматической разбивки ANSYS. При этом использованы элементы в форме тетраэдров и пирамид – для крышки и гексаэдров – для дополнительных объемов. Для разработки конечно-элементной модели принят, имеющий форму тетраэдра, элемент SOLID 185, который выбран в связи с тем, что он может иметь любую пространственную ориентацию; является элементом второго порядка и определяется двадцатью узлами, каждый из которых имеет три степени свободы.

В разделе представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) крышки редуктора двигателя (далее – крышки), изготовленной с использованием методов аддитивного производства из двух вариантов материалов проволоки – алюминиевого

сплава AlSi5 и сплава алюминия с магнием AlMg5 в качестве присадочного материала.

Наименование и материал крышки согласно техническим требованиям чертежа приведены в таблице 1. Там же указаны варианты исполнения крышки из сплава AlSi5 и сплава AlMg5. Твердотельная модель на рис. 1.

Рабочая температура крышки составляет $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для упрощения расчета были проведены работы по выявлению неопасных объемов металла и установлено, что отверстия на фланце крышки являются таковыми. Твердотельная модель после упрощения приведена на рис. 1.

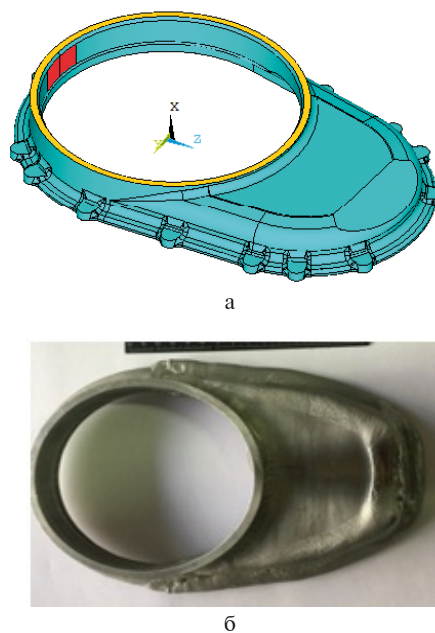


Рис. 1.

а - упрощенная твердотельная модель крышки с указанием поверхностей приложения нагрузок,
б - выращенная деталь крышки редуктора из алюминиевого сплава

Нагрузки, действующие на крышку:

- $F_a=3200\text{ Н}$ - осевая нагрузка на поверхность торца цилиндра в направлении, противоположном положительному направлению оси X (рис. 1 - поверхность выделена желтым цветом);

- $F_r=300\text{ Н}$ - постоянная радиальная нагрузка на цилиндрическую поверхность в направлении, противоположном положительному направлению оси Z (см. рис. 1 - поверхность выделена красным цветом).

Свойства материалов крышки при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, используемые при расчете НДС, приведены в таблице 1.

Кривые деформирования $\sigma=f(\epsilon)$ материалов AlSi и AlMg, принятых для расчета напряженно-деформированного состояния крышки, для температуры $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, приведены на рисунке 2.

Таблица 1. Свойства рассматриваемых материалов крышки при рабочей температуре 150 °С.

пп/п	Параметр	Обозначение	Ед. изм.	AlSi5	AlMg5	МЛ10
1	Предел кратковременной прочности	σ_B^t	МПа	112	20,6	20,6
2	Предел текучести	σ_{02}^t	МПа	79	13,1	14,1
3	Предел пропорциональности	$\sigma_{пр}^t$	МПа	67	11,1	9,6
4	Плотность	ρ	кгс/м ³	2680	2650	1780
5	Модуль упругости	E	кгс/мм ²	5900	6200	4068
6	Коэффициент линейного расширения	α	1/°С	$2,39 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
7	Относительное удлинение	δ	%	22,8	32,7	8,0
8	Коэффициент Пуассона	μ	-	0,33	0,3	0,33

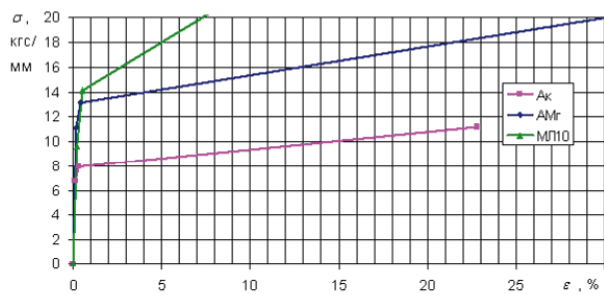


Рис. 2. Кривые деформирования материалов AlSi5 и AlMg5, принятых для расчета напряженно-деформированного состояния крышки, для температуры 150 °С.

В узлах модели задана постоянная по величине рабочая температура 150 °С. К поверхности торца цилиндра (выделена желтым на рисунке 1) приложена осевая нагрузка $F_a = 3200$ Н, равномерно распределенная по узлам. К узлам цилиндрической поверхности (на участке, выделенном красным на рисунке 1) приложена радиальная нагрузка $F_r = 300$ Н, равномерно распределенная по узлам.

Решение задачи структурного анализа выполнено в модуле Solution программного комплекса ANSYS с учетом кривых деформирования материалов крышки с применением метода итерационного PCG. Указанный метод рекомендуется для больших моделей из объемных элементов.

По результатам структурного анализа крышки в постпроцессоре выполнена визуализация распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и определены зоны максимальных эквивалентных напряжений в крышке. В зоне с максимальными эквивалентными напряжениями выделено сечение, в котором определен коэффициент запаса статической прочности по

формуле:

$$K_B = \frac{\sigma_B^t}{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{ср}}} \quad (1)$$

где σ_B^t - предел кратковременной прочности материала крышки при рабочей температуре;

$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{ср}}$ - средние эквивалентные напряжения в рассматриваемом сечении.

Средние эквивалентные напряжения определены в постпроцессоре программного комплекса ANSYS в соответствии с алгоритмом, описываемым формулой:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{ср}} = \frac{1}{n-1} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^1}{2} + \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^n}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} \sigma_{\text{ЭКВ}}^i \right) \quad (2)$$

где n - количество узлов на линии с максимальными напряжениями в рассматриваемом сечении;

$\sigma_{\text{ЭКВ}}^1$, $\sigma_{\text{ЭКВ}}^n$ - эквивалентные напряжения в первом и n -ом узле на линии с максимальными напряжениями в рассматриваемом сечении.

В результате структурного анализа крышки в постпроцессоре выполнена визуализация распределения эквивалентных напряжений и определены зоны максимальных эквивалентных напряжений в крышке.

Напряженно-деформированное состояние крышки, нагруженной рабочей температурой и действующими усилиями, изготовленной из сплавов AlSi5, AlMg5 и МЛ10 приведено на рисунке 3 а – в, соответственно. Как видно из рисунков зона максимальных эквивалентных напряжений расположена в зоне перехода фланца крепления крышки.

Результаты расчета средних эквивалентных напряжений в критическом сечении и коэффициента запаса статической прочности приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета средних эквивалентных напряжений в критическом сечении и коэффициента запаса статической прочности.

№п/п	Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Сплав AlSi5	Сплав AlMg5	Сплав МЛ10
1	Максимальные эквивалентные напряжения	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$	кгс/мм ²	7,9	12,7	11,3
2	Средние эквивалентные напряжения	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{ср}}$	кгс/мм ²	4,3	6,0	5,1
3	Предел кратковременной прочности	σ_B^t	кгс/мм ²	11,2	20,6	20,6
4	Коэффициент запаса статической прочности	K_B	-	2,6	3,4	4,0

Как видно из таблицы 2, коэффициенты запаса статической прочности крышки, изготовленной из AlSi5, AlMg5 и МЛ10, удовлетворяют нормативным требованиям. Учитывая, что величина максимальных эквивалентных напряжений крышки из материала AlSi5 соответствует пределу текучести данного сплава, на рисунке 3 приведены зоны пластической деформации крышки.

Как видно из рисунка 3, зоны пластической деформации в крышке из материала AlSi5 расположены в зонах перехода фланца крепления крышки.

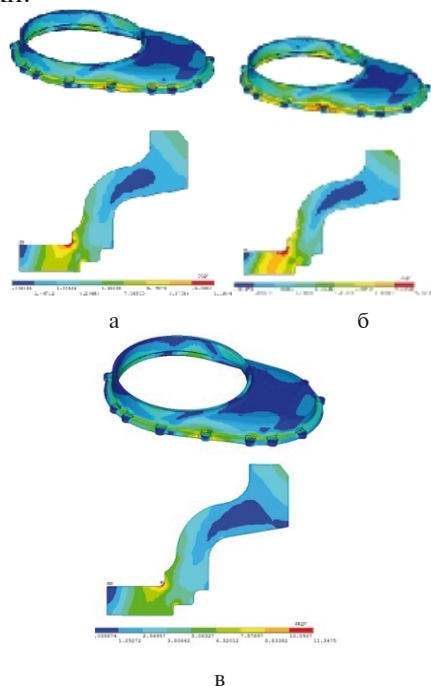


Рис 3. Напряженно-деформированное состояние крышки, нагруженной рабочей температурой и действующими усилиями.

а - из сплава AlMg5, б - из сплава AlSi5,
в - из сплава МЛ10

Таким образом, получена модель крышки редуктора и проведен ее расчет методом конечных элементов. Установлены коэффициенты запаса статической прочности крышки, изготовленной из магниевого сплава МЛ10

или с использованием методов аддитивного производства из двух вариантов материалов проволоки из сплава AlSi5 и сплава AlMg5 в качестве присадочного материала.

Заключение

Коэффициент запаса прочности для сплава AlSi5 и AlMg5 равен 2,6 и 3,4 соответственно. Для сплава МЛ10 – 4,0. При этом, прочностные характеристики сплавов AlMg5 и МЛ10 находятся на одном уровне. Это позволяет утверждать, что изделие из сплава AlMg5, изготовленное аддитивными технологиями может применяться взамен ранее применяемых изделий из сплава МЛ10, которые изготавливались по стандартным технологиям литья. Несмотря на снижение коэффициента запаса прочности на 0,4, применение аддитивных технологий для изготовления крышки редуктора из сплава AlMg5 позволит сократить долю человеческого фактора при возникновении брака, существенно снизить отходы при производстве за счет отсутствия литейных систем и т.д. При этом возможно изменение конструкции с целью уменьшения ее веса.

Литература

1. Gnatenko M. et al, Detecting the influence of heat sources on material properties when production aviation parts by a direct energy deposition method // Eastern-european journal of enterprise technologies ISSN1729-3774
2. Zhang Y., et al., Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. Journal of Materials Processing Technology, 2003. 135(2-3): p. 347-357.
3. Wang H. and R. Kovacevic, A novel welding-based solid freeform fabrication technology for aluminum, 84th Annual AWS Convention, 2003: Detroit, Michigan, USA. p. 2.
4. Ding J., et al., Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. Computational Materials Science, 2011. 50(12): p. 3315-3322.

Поступила в редакцию 12.06.2019

М.О. Гнатенко, В.В. Наумік, М.В. Матковська. Виготовлення авіаційної деталі кришки редуктора адитивним методом

Дослідження проводилися з метою забезпечити механічні, технологічні та експлуатаційні властивості деталей з конструкційних алюмінієвих сплавів (AlSi5, AlMg5) авіаційного призначення, вирощених адитивним методом з використанням дроту (WAAM). Для виконання поставленої мети було необхідно вирішити такі завдання: отримати заготовки серійних деталей з необхідною геометрією, експлуатаційними і технологічними властивостями і виконати розрахунок напружено-деформованого стану отриманих заготовок деталі. Вирощування заготовки деталі проводилося за допомогою сварочного апарату інвертора Fronius MagicWave 1700 і робота FANUC. Короткочасні жароміцні випробування проводили згідно ГОСТ 25.601-80 на машині АМА-5-2. Міцнісний розрахунок напружено деформованого стану проводився з використанням ліцензійної версії програмного

комплекса ANSYS 18.1. Для розробки кінцево-елементної моделі прийнятий елемент SOLID 185, що має форму тетраедра. Результат проведення розрахунку напружено-деформованого стану показав, що коефіцієнт запасу міцності для сплаву AlSi5 і AlMg5 дорівнює 2,6 і 3,4 відповідно. Для сплаву МЛ10 – 4,0. При цьому, міцності сплавів AlMg5 і МЛ10 знаходяться на одному рівні. Це дозволяє стверджувати, що виріб зі сплаву AlMg5, виготовлений адитивними технологіями може застосовуватися на заміну раніше застосовуваних виробів зі сплаву МЛ10, які виготовлялися за стандартними технологіями лиття.

Ключові слова: адитивні технології, адитивне вирощування, алюмінієві сплави, авіаційні деталі, WAAM (Welding + arc additive manufacturing).

М.О. Gnatenko, V.V. Naumik, M.V. Matkovskaya. Manufacturing of aviation detail of the reducer cover by the additive method

Studies were conducted to ensure the mechanical, technological and operational properties of parts made of structural aluminum alloys (AlSi5, AlMg5) for aviation purposes grown by the additive method using wire (WAAM). To accomplish this goal, it was necessary to solve the following tasks: to obtain blanks of serial parts with the necessary geometry, operational and technological properties and to perform a calculation of the stress-deformable state of the obtained blanks of the part. The cultivation of the workpiece was carried out using the Fronius MagicWave 1700 inverter c-welding machine and the FANUC robot. The short-term heat-resistant tests were carried out according to GOST 25.601-80 on the AIMA-5-2 machine. strength analysis of the stress-strain state was carried out using the licensed version of the software package ANSYS 18.1. To develop a finite element model, the SOLID 185 element having the shape of a tetrahedron was adopted. The result of the calculation of the stress-strain state showed that the safety factor for the AlSi5 and AlMg5 alloy is 2.6 and 3.4, respectively. For alloy ML10 – 4.0. at the same time, the strength characteristics of alloys AlMg5 and ML10 are on the same level. This suggests that the product from the alloy AlMg5, made by additive technologies, can be used instead of the previously used products from the alloy ML10, which were made according to standard casting techniques.

Key words: additive technology, additive growing, aluminum alloys, aircraft parts, WAAM (Welding + arc additive manufacturing).

References

1. Gnatenko M. et al, Detecting the influence of heat sources on material properties when production aviation parts by a direct energy deposition method // Eastern-european journal of enterprise technologies ISSN1729-3774
2. Zhang, Y., et al., Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. Journal of Materials Processing Technology, 2003. 135(2-3): p. 347-357.

3. Wang, H. and R. Kovacevic, A novel welding-based solid freeform fabrication technology for aluminum, 84th Annual AWS Convention, 2003: Detroit, Michigan, USA. p. 2.
4. Ding, J., et al., Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. Computational Materials Science, 2011. 50(12): p. 3315-3322.