

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А.Буркитбаева

Кафедра индустриальной инженерии

Мусин Н.К.

Исследование применения аддитивной технологии Direct Metal Tooling при изготовлении деталей

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В071200 – Машиностроение

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А.Буркитбаева

Кафедра индустриальной инженерии

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой ИИ
доктор PhD

_____ Арынбеков Б.С.
« _____ » _____ 2020 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование применения аддитивной технологии Direct Metal
Tooling при изготовлении деталей»

По специальности 5В071200 - Машиностроение

Выполнил

Мусин Н.К.

Рецензент

Научный руководитель
Кандидат технических наук
ассистент - профессор
_____ Арынбеков Б.Н.

« _____ » _____ 2020 г.

« _____ » _____ 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации им. А.Буркитбаева

Кафедра индустриальной инженерии

5B071200 – Машиностроение

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ИИ
доктор PhD

_____ Арынбеков Б.С.
« _____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Мусину Нурлану Коблановичу

Тема: «Исследование применения аддитивной технологии Direct Metal Tooling при изготовлении деталей» Утверждена приказом ректора университета № 762-б от «27» января 2020 г.

Срок сдачи законченной работы «01» июня 2020ж.

Исходные данные к дипломной работе: а:

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) Исследование истории создания аддитивных технологий
- б) Изучить области применения технологии Direct Metal Tooling

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): представлены 15 слайдов презентации работы.

Рекомендуемая основная литература: 6 наименований

ГРАФИК

подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологическая часть	11.02-11.03.2020	
Конструкторская часть	12.03-16.04.2020	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Арынбеков Б.С.		
Нормоконтролер	Арынбеков Б.С.		

Научный руководитель _____ Б.С. Арынбеков

Задание принял к исполнению обучающийся _____ Н.К. Мусин

Дата

«11» 02 2020 г.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте исследовано использование аддитивной технологии Direct Metal Tooling. Direct Metal Tooling широко используется в абсолютно разных областях промышленности, начиная от медицины и заканчивая авиацией

Кроме того, мы полностью изучили качество печатаемого изделия на 3D принтере. В частности, мы рассмотрели погрешности и экономическую эффективность при изготовлении деталей авиационной промышленности.

В технологии Direct Metal Tooling используются самые современные принтеры, позволяющие печатать как детали, так и станки для их создания. Сегодня мы можем не заменять старые авиационные двигатели на новые дорогостоящие, а создавать поврежденные детали с нуля.

АННОТАЦИЯ

Бұл дипломдық жобада Direct Metal Tooling аддитивті технологиясын қолдану зерттелген. Direct Metal Tooling медицина бастап және авиациямен аяқталатын мүлдем түрлі салаларда кеңінен қолданылады

Сонымен қатар, біз 3D принтерде басып шығарылатын өнімнің сапасын толық зерттеудеміз.

Атап айтқанда, біз авиациялық өнеркәсіп бөлшектерін жасау кезіндегі қателіктер мен экономикалық тиімділікті қарастырдық.

Direct Metal Tooling технологиясында бөлшектерді және оларды жасау үшін станоктарды басып шығаруға мүмкіндік беретін ең заманауи принтерлер қолданылады. Бүгінде біз ескі авиациялық қозғалтқыштарды қымбат тұратын жаңа қозғалтқыштарға ауыстырмай, бүлінген бөлшектерді нөлден шығара аламыз.

ANNOTATION

This diploma project explores the use of Direct Metal Tooling additive technology. Direct Metal Tooling is widely used in completely different areas of industry, from medicine to aviation.

In addition, we have fully studied the quality of the printed product on the 3D printer.

In particular, we looked at errors and cost-effectiveness in the manufacture of parts for the aviation industry.

Direct Metal Tooling technology uses state-of-the-art printers that allow you to print both parts and machines to create them. Today, we cannot replace old aircraft engines with new expensive ones, but create damaged parts from scratch.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Что такое аддитивные технологии?	10
1.1 Additive Manufacturing	10
1.2 Классификация и терминология	12
1.3 Direct Metal Tooling	13
2 Процесс DMT	13
2.1 Преимущества Direct Metal Tooling	13
2.2 Применение технологии DMT в авиационной промышленности	16
3 Методы исследования	17
3.1 Практическое значение	19
3.2 Экономическая эффективность применения аддитивных технологий	19
3.3 Заключение	26
Список использованной литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

В конце 80-х гг. прошлого столетия на свет появилась уникальная технология “3D печати”. Первооткрывателем сумевшим разработать и монетизировать аппарат стереолитографии (“SLA”-Stereolithography Apparatus) стал Чарльз Халл и его компания 3D Systems. Первые производившиеся машины имели существенные недостатки, а именно высокий ценник и скудный ассортимент модельного ряда, вследствие чего пионеров среди лазерных машин, а именно стереолитографические (SLA), позже порошковые (SLS) использовали лишь в исследовательской и конструкторской деятельности, непосредственно связанными с военно-оборонной промышленностью, ведь только эти структуры могли позволить себе такие расходы. В XXI веке, вам понадобится приложить массу усилий для того, чтобы найти профиль материального производства, в котором так или иначе не использовались бы аддитивные технологии, а повсеместная популяризация цифровых методов в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE), а также механической обработки (CAM), способствовала быстрому развитию технологий 3D печати.

1 Что такое аддитивные технологии?

1.1 Additive Manufacturing

Давайте разберёмся, что же представляют из себя “Additive technologies”? Суть кроется в этимологии слова- Add, что в переводе означает добавлять. То есть в отличие от классического метода создания физических объектов (отделения лишних фрагментов от целостного массива), в аддитивных технологиях мы создаем деталь методом послойного приращения материала.

На рисунке 1 я хочу привести пример технологии Additive Manufacturing



Рисунок 1- Additive Manufacturing (3D Globaltec)

При эксплуатации аддитивных технологий (на англоязычных ресурсах- Additive Manufacturing, Additive Fabrication, возможно в будущем AM-, AF-technologies) мы, к счастью для современных инженеров, можем отойти от архаичной бумажной чертежной документации, так как все этапы выполнения проекта, от образа объекта до получения конечной физической детали, существуют в неразрывной цепи, где любое технологическое действие выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE- системе.

Сферы деятельности людей, охватываемые 3D технологиями, сегодня весьма обширны. Конструкторы, строители, кулинары, медики, астрономы, палеонтологи, учителя и представители совсем разных ремёсел используют 3D-принтеры для реализации самых интересных, а порой кажущихся невозможными проектов [1].

1.2 Исторические предпосылки появления аддитивных технологий

Первыми прототипами AM-технологий XXI в. являются две оригинальные технологии, берущие свое начало еще в XIX в. Западный деятель науки Джозеф Блантер подал идею альтернативного способа создания трёхмерных топографических карт местности. Вся суть его метода сводится к тому, что из легких восковых массивов вырезались части, соответствующие контурным линиям объектов и послойно накладывались пластинами друг на друга, в соответствии с определенными параметрами физических объектов. В результате получается “послойное создание” естественных рельефов. Пример мы можем увидеть на рисунке 2.

J. E. BLANTHER.
MANUFACTURE OF CONTOUR RELIEF MAPS.
No. 473.901. Patented May 3, 1892.

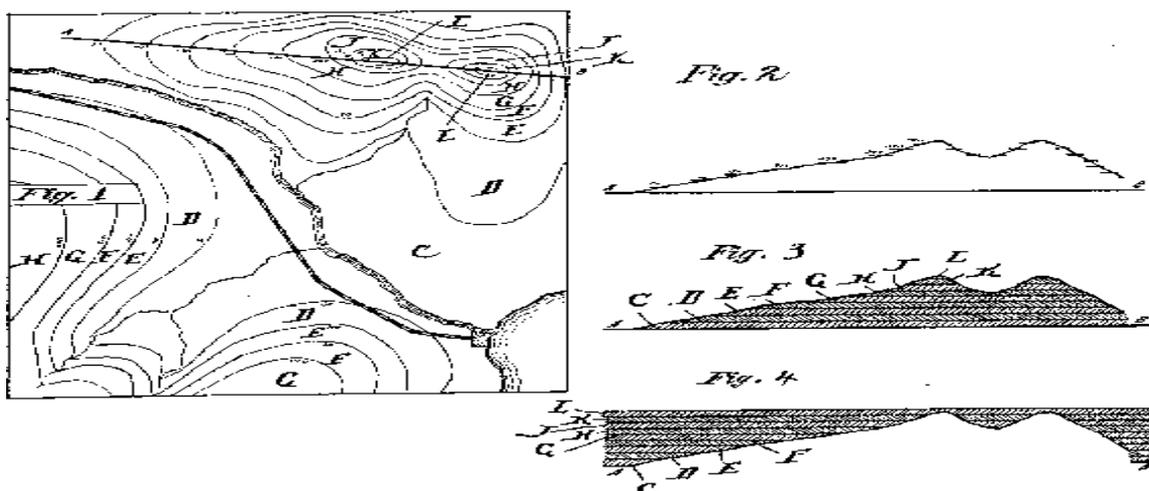


Рисунок 2 - Blanther J.E. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

Вторая технология которую я хочу разобрать состоит из следующих действий. В центре формальной окружности находится объект, который усеян фотокамерами, к слову создатель технологии- французский теоретик и практик François Willème окружал объект 24-мя камерам, с шагом непосредственно в 15 градусов, затем камеры воспроизводят единовременную проекцию на белое полотно и человек, с помощью специального аппарата (пантографа), обрисовывает контур. Пантограф в свою очередь имел связь с инструментом, который отделял модельный материал - глину, в соответствии с контуром. Пример вы можете увидеть на рисунке 3.

Начиная с 1977 гг. ученые со всего мира начинают патентовать свои новые технические решения по АМ-технологиям, к их числу относятся: Уин Келли Суэинсон (Patent USA № 4041476), Р.Ф. Хаусхолдер (Patent USA № 4247508), Хидео Кодама, А. Херберт. Патентование приобрело лавинообразный характер пока, как я уже говорил, в 1986 году Чарльз Халл не предложил метод синтеза с помощью ультрафиолетового излучения, ввел в наш лексикон слово “стереолитография” и не стал основателем компании 3D systems, что положило начало эпохе аддитивных технологий [1].



Рисунок 3 - Фотоскульптура по технологии François Willème

1.3 Классификация и терминология

Организация American Society for Testing and Materials (далее “ASTM International”) занималась моментами, которые касались терминологии аддитивных технологий, что является её основным видом деятельности. В стандарте ASTM F2792.1549323-1 аддитивные технологии определены как «процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий». Под “вычитающими” технологиями имеются в виду классические технологии механообработки, ASTM пришло к такому понятию, для того чтобы определить новое- “добавлять” (add).

Различают два основных вида аддитивных технологий: Bed Deposition и Direct Deposition [2].

Суть метода Bed Deposition заключается в том, что у нас имеется определенная поверхность (“bed”), на которой насыпается и разравнивается порошковый слой, некой толщины. После чего участки полученного слоя обрабатываются лазером, либо другими способами, вследствие чего частицы порошка соединяются соответственно с заданным сечением.

Суть метода Direct Deposition заключается в том, что энергия направляется в указанную точку и уже непосредственно в этой точке насаждается материал, Главное отличие от Bed Deposition- это то, что для создания структуры детали, мы не формируем слой материала, а непосредственно подаём его в конкретную область [3].

Технология Direct Metal Tooling, чьё применение я разбираю в своей дипломной работе относится к методу Direct Deposition.

2 Direct Metal Tooling

2.1 Процесс DMT

Direct Metal Tooling (далее DMT)- является одной из новейших и передовых технологий создания металлических изделий. Как и в большинстве процессов относящихся к Bed Deposition, здесь применяется направленная в конкретную точку построения энергия. Процесс работы начинается с того, что в 3D принтер мы загружаем САD-модель объекта, современное программное обеспечение разбивает нашу модель на своеобразные слои и деталь создается слой за слоем.

Далее разбор технологии я поведу на примере работы Южнокорейской компании- “InssTek”, являющейся одним из пионеров в области аддитивных технологий и в частности DMT. Большая мощность лазерного луча позволяет создавать ту самую зону расплава, куда с определенной дозировкой подается порошок, который расплавляется лучом и мгновенно затвердевает в данной зоне. Деталь формируется на специально сконструированном 3- или 5-осевом столе, в который также предусмотрены дополнительные каналы для подачи порошков и газов. Одним из самых важных условий для высокой точности 3D-принтинга является ювелирная настройка толщины металлического слоя, что мы направляем. Direct Metal Tooling принтеры во владении InssTek, оборудованы системой контроля, в чью функцию входит обратная связь, измерение толщины слоя и smart регулировка параметров, благодаря CCD камерам. Также различают 3 модуля стандарта для подачи порошка- 150,250 и 400 мкм. Вручную можно варьировать слой от 100 до 1000 мкм, в соответствие с требованием [6].

2.2 Преимущества Direct Metal Tooling

Размер изделия. Особенность DMT технологии заключается в способности создания и работы с изделием неограниченного размера. В частности установки компании InssTek достигают рабочей зоны до 4000мм, в связи с удовлетворением просьбы заказчик. Главный принцип DMT позволяет регулировать площадь рабочей зоны [6].

Механические свойства изделий напечатанных на 3D принтерах соответствуют самым высоким требованиям ГОСТ, их плотность достигает 100%, за счет высокой точности машин, в изделиях отсутствуют внутренние дефекты и неточности, а также одно из преимуществ DMT технологий- это отсутствие необходимости постермической обработки изделия для его отжига. Далее в Таблице 1 я хочу привести примеры механических свойств изделий изготовленных по технологии DMT

Таблица 1. Механические свойства изделий

Материал	UTS(МПа)	YS(МПа)	Удлинение(%)	HRC
Сталь H13 (традиционные методы)	1821	1385	9	51
Сталь H13 (DMT, длина)	1927	1066	5	54
Сталь H13 (DMT, ширина)	1998	1477	5	
	920	793	20	33
Сталь P21 (DMT, ширина)	1090	1016	18	1

3D принтеры компании InssTek позволяют вести работу одновременно с несколькими материалами, что позволяет изготавливать детали, состоящие из различных по своим свойствам металлических слоев, причем их формирование осуществляется на молекулярном уровне. Далее, для предохранения механизмов от износа, наносятся защитные покрытия методом наплавки.

SDM модуль отвечает за важнейшие процессы в работе 3D принтера, а именно за наплавление металлического слоя на деталь изделия. У каждого SDM модуля имеется система оптики, которая формирует и фокусирует мощность лазерной энергии, уже собранной системой в пучок с радиусом до 900 микрон, в зависимости от типа модуля и направляет его на поверхность детали. Сопла интегрированные в SDM модуль подают в расплавленную зону металлический порошок, который мгновенно остывает и затвердевает, сам модуль движется по строго заданной траектории и процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет выращено или восстановлено. SDM модуль может двигаться по осям X;Y;Z с точностью до 50-ти мкм, также в зависимости от размера в пластину также закрепляют питатели объемом 0,6/1 литр, в которые выгружается рабочий материал, как мы успели отметить материалы могут быть разными и SDM модуль может вести работу с 3-мя порошками одновременно, все процессы и

детали модуля неразрывно связаны между собой: соплы подающие материал, питатели хранящие его и камеры, что замкнуто следят за качеством и точностью выполнения работы.

Металлические порошки применяемые, например, в технологии SLM, существенно отличаются от тех, что мы используем в 3D печати DMT. Например размер гранул применяемых в DMT определенно больше, около 50-150 мкм, за счет чего их цена оказывается ниже, также экономичность данной технологии подтверждается тем, что для создания изделия мы загружаем ровно то количество металлического порошка, которое требуется, в отличие например от технологии Selective Laser Melting, где в независимости от размера, обычно требуется загрузить не менее 50 кг порошка [5].

3 Применение технологии DMT в авиационной промышленности.

Аддитивные технологии, как уже описывалось раньше, всё чаще находят своё применение в качестве альтернативы традиционным методам. Авиационная промышленность также не стала исключением. Это связано со сложностью используемых конструкций и постоянно растущими техническими требованиями к деталям. Преимуществом аддитивных технологий является возможность сокращения длительности технологического цикла производства, сокращения номенклатуры производственного оборудования, оснастки и повышения экономических показателей себестоимости, в том числе за счет сокращения времени подготовки к выпуску продукции. Наибольший технико-экономический эффект достигается при производстве сложных, ответственных изделий в том числе при наличии в технологическом процессе операций окончательной сборки для получения готовой продукции. Благодаря применению АТ в технологических циклах появляется возможность многократно уменьшить массу проектируемой детали/узла/изделия, сохраняя при этом все технические требования к детали (прочность, твердость, износ и др.). Появляется возможность управлять свойствами отдельных частей детали за счет использования различных материалов и их сочетаний с улучшенными свойствами. Лопастные блоки являются одним из важнейших элементов современных авиационных двигателей, их главным недостатком является то, что они изготавливаются композитными с целью уменьшения дорогостоящих материалов. Необходимость создания конечной сборки ощутимо повышает требования к точности отдельных элементов и в конечном итоге приводит к увеличению их стоимости. Также с технической стороны, зазоры которые необходимы для корректной работы конструкции, приводят к изменению ее баланса, высокой нагрузке и износу отдельных элементов и, в конечном итоге, к дорогому ремонту всего двигателя в целом.

Одним из решений этой проблемы, является переход на наплавку рабочих элементов лопаток из необходимого материала за счет использования

Direct Metal Technology (далее DMT). В этом случае становится возможным разработать гибридную технологию включающую DMT необходимых элементов и их последующую обработку на одной технологической установке оборудования. DMT рассматривается как способ выращивания деталей, совмещенный в одиночном блоке оборудования с процессом вырезания металла. Далее мы рассмотрим технологические аспекты применения такой гибридной технологии относительно процесса изготовления деталей- типа крыльчатка [4].

3.1 Методы исследования.

Согласно техническим требованиям предъявляемым к механической обработке и сборке деталей типа “крыльчатка” необходимо соблюдать принципы единства конструкторской и технологической базы в процессе выполнения всей технологической цепочки включая сборочную операцию.

Главное требование для минимизации влияния ошибок, возникающих в процессе изготовления, на отдельные элементы (n -лопасти), в рамках точности сборки конечной детали [4].

$$F_{\omega} = \sum_{n=1}^N F_n^2 \stackrel{\text{def}}{=} 0 \quad (3.1)$$

Проблема заключается в том что типичные производственные процессы для таких деталей не всегда соответствуют этим требованиям.

В данном разделе рассматриваются технологические аспекты обеспечения точности обработки и сборки детали типа крыльчатка, с точки зрения сравнения составляющих погрешности обработки и сборки, возникающих при реализации традиционных и гибридных технологий применительно к деталям типа “крыльчатка”. В общем, полная функция процесса обеспечения точности выполнения детали может выглядеть так [4]:

$$F_t = \sum_{i=1}^N F_i^2(y_1, z_1, y_2, z_2, \dots, y_n, z_n) \quad (3.2)$$

Согласно предыдущей формуле погрешность F_t , влияющая на работу детали- это алгебраическая сумма размеров производственных ошибок. Y - инженерная основа механической обработки, n - канавки[4].

$$\varepsilon_y = F(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (3.3)$$

Износ инструмента (z_1), амортизационная оснастка (z_2), внешние случайные факторы (например: частичное изменение температуры, отсутствие охлаждающей жидкости z_n) и ошибки производства размеров, Z -основание установки для агрегата, n - детали лопастей [4]:

$$\varepsilon_z = F(z_1, z_2, \dots, z_n), \quad (3.4)$$

Износ инструмента (z_1), амортизационная оснастка (z_2), внешние случайные факторы (например: частичное изменение температуры, отсутствие охлаждающей жидкости z_n). Давайте введем обозначение для каждого члена сборки n :

$$D_n = \sum_{i=1}^N F_i^2(y_n, z_n) \quad (3.5)$$

При сборке данных об ошибках для каждого из них. n – элементы сборки накладываются друг на друга и , возникает ошибка сборки F_s . За счет того, что

положение каждого из n – элементов сборки в пространстве изменяется на угол λ , тогда величина погрешности сборки будет определяться суммой векторов F_s

$$\overline{F_s} = \sum_{i=1}^N \overline{D_n} \quad (3.6)$$

$$\overline{D_n} = (\overline{y_1} + \overline{z_1}) + (\overline{y_2} + \overline{z_2}) + \dots + (\overline{y_n} + \overline{z_n}) \quad (3.7)$$

Пусть для единичной суммы векторов $(y + z)$ их координаты $(y_a, z_a, y_b, z_b, y_c, z_c)$ даны в прямоугольной системе координат тогда мы получаем:

$$\begin{aligned} \overline{F_s} = \sum_{i=1}^N \overline{D_n} = & \{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_1 + \{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_2 + \dots \\ & + \{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

С учетом формул (3.3), (3.4) выражение (3.2) будет сведено к виду:

$$F_t = \sqrt{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) + (z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2)} \quad (3.9)$$

Учитывая (3.7), выражение (3.8) принимает вид:

$$\begin{aligned} F_t = & \sqrt{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) + (z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2) +} \\ & \sqrt{(\{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_1 + \{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_2 + \dots + \{y_a + z_a, y_b + z_b, y_c + z_c\}_n)^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Выражение (10) позволяет рассчитать величину погрешности при сборке каждого n -компонента детали “крыльчатка”, учитывая погрешность ее обработки. Выражение (10) противоречит функции (1), (2) для обеспечения точности размерной обработки “крыльчатки”. Y - инженерная база для механической обработки, n - пазы и производственные ошибки размеров, Z - основание установки для сборки n -деталей лопастей, которые мы вынуждены учитывать в расчетах -векторном значении погрешности сборки. Следовательно в расчетах есть противоречие:

$$0 = F_\omega \neq \sum_{n=1}^N F_n^2 = \sum_{n=1}^N (F_t^2 + F_s^2) \quad (3.10)$$

Для случая обработки размеров Y, Z деталей типа “крыльчатка” в цикле Аддитивного производства, в расчетах (2), (3), (9) можно пренебречь значением составляющих погрешности размеров Y, Z из за отсутствия механической обработки и в выражениях (8), (10) для значения D_n как набора компонентов погрешностей размеров F_t учитывая их малый размер (станок ЧПУ обеспечивает вращение заготовки на угол λ). Далее по размерам Y, Z деталей типа крыльчатка, в циклах обработки ДМТ, основанных на преобразованиях выражений (2), (3), (8), (9), (10), у нас вытекает равенство, близкое к истинному выражению (1)

$$F_{\omega} \approx \sum_{n=1}^N F_n^2 = \sum_{n=1}^N (F_t^2 + F_s^2) \stackrel{\text{def}}{=} 0 \quad (3.11)$$

согласно выражению (12) использование ДМТ в построении технологических циклов деталей типа “крыльчатки” значительно снизит влияние погрешности механической обработки на точность изготовления деталей в том числе, за счет исключения ряда накладываемых погрешностей процесса их сборки. Это обеспечивает дополнительный запас для достижения заданной точности изготовления также ресурс для уменьшения технологических припусков, как на одну деталь, так и на металлоемкость агрегата в целом.

3.2 Практическое значение

В настоящее время такие гибридные технологические процессы все чаще находят свое применение в производстве деталей широкого ассортимента. Применение ДМТ позволяет управлять свойствами отдельных поверхностей путем объединения различных комбинаций материалов. Однако детали полученные по этой технологии для авиационной промышленности являются полуфабрикатами из-за необходимости переустановки деталей на станке для механической обработки. Это приводит к ошибкам базирования и монтажа. Поэтому в настоящее время на рынке технологического оборудования появляются специальные технологические комплексы, позволяющие реализовать гибридную технологию по полному циклу на одной машине.

Используются гибридные технологические комплексы на базе 3-5 осевых станков с ЧПУ. Это позволяет значительно повысить гибкость производственной цепочки без ухудшения качества выпускаемой продукции.

3.3 Экономическая эффективность применения аддитивных технологий на основе Direct Metal Tooling в производстве авиационных деталей.

Эффективность технологии при ее внедрении в производственный процесс на равных начальных условиях определяется двумя критериями: продолжительностью производственного цикла и стоимостью одной детали. При идентичном конечном качестве детали именно эти два критерия в совокупности влияют на окончательный выбор технологии производства. Аддитивные технологии сегодня все чаще рассматриваются, как альтернатива традиционным технологиям типа: штамповка, ковка, различные виды литья. Заготовка, полученная по этой технологии, является, по сути готовой деталью, за исключением поверхностей к которым предъявляются особые требования по точности, шероховатости, форме этой поверхности, а также ее расположению относительно расчетной базы детали. Рентабельность производства заготовок

полученных по аддитивным технологиям тем выше, чем сложнее конфигурация конечных деталей, чем больше их номенклатура и чем меньше годовой объем производства. Наибольшую производительность при применении технологий аддитивного производства можно получить, интегрируя их в технологическое оборудование для механической обработки. Это позволяет сократить объем оборудования, продолжительность технологического процесса, затраты на логистику до 30% от стоимости детали, затраты на основной и вспомогательный персонал, затраты на производственные площади. Это наиболее актуально для высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как: авиастроение, ракетостроение и др. В данной части исследуется эффективность применения аддитивных технологий основанных на Direct Metal Tooling [5].

Далее рассмотрим варианты технологических процессов изготовления деталей авиационного кронштейна. Для сравнения в качестве основного варианта технологии выбран стандартный традиционный технологический процесс, а в качестве перспективного варианта- вариант с использованием аддитивного цикла. В этой работе мы выполняем топологический анализ детали. Топологический анализ отражает основные этапы формирования геометрии готовой детали из заготовки, с использованием как классических технологий изготовления авиационных деталей, так и технологий аддитивного изготовления. Классическая технология значительно проигрывает во многих аспектах производственного цикла.

В данной таблице предлагаю рассмотреть сравнительный анализ шагов, предпринимаемых для создания детали традиционным и DMT способами.

Таблица 3.1. Сравнительный анализ создание деталей разными способами

Традиционная технология	DMT технология
1. Детальный чертеж	1. Детальный чертеж
2. Разработка части производственной технологии	2. Разработка части производственной технологии
3. Разработка прибора	3. Разработка 3D-модели
4. Изготовление прибора	4. DMT-технология
5. Черновая обработка	5. Контроль
6. Нормализация	
7. Полуобработка	
8. Закалка термообработкой	
9. Тонкая обработка	

10. Покрытие прибора	
11. Сборка прибора	
12. Корректировка прибора	
13. Проверка прибора	
14. Ввод в эксплуатацию	
15. Производство деталей	
16. Контроль	

Технико-экономический эффект от применения аддитивных технологий определяется влиянием затрат на основное оборудование, технологическое оснащение и содержание специалистов участвующих в работе. Сравнительный анализ количества необходимых специалистов при использовании традиционных и аддитивных технологий приведен в следующей таблице.

Таблица 3.2. Сравнительный анализ необходимых специалистов для двух технологий

Традиционные производственные технологии	DMT технологии
Конструктор деталей	Конструктор деталей
Инженер производства	Оператор 3D-принтера
0	Технолог
0	Экономист
Пре Продакшн Дизайнер	0
Технолог вспомогательного производства	0
Технолог станка с ЧПУ	0
Оператор станка с ЧПУ	0

Контроллер вспомогательного производства	0
Слесарь	0
Литейный технолог	0
Оператор печи для отжига	0
Оператор гальванической ванны	0
Транспортный оператор	0

Исходя из данных таблицы, при использовании DMT технологии, происходит многократное сокращение номенклатуры, оборудования и специалистов и как следствие оптимизация расходов.

Выполняя технико-экономическое сравнение, рассмотрим имитационную модель традиционной технологии, как форму организации производства (обозначим C_1) и модель производства с использованием DMT технологий (C_2). Модель учитывает влияние α - критерия: количество оборудования, предметы необходимого технологического оборудования (стоимость и количество предметов), количество специалистов (трудозатраты). Параметром годовой программы производства деталей является одинаковым для двух сравниваемых форм организации производств C_1 и C_2 : $N = N_1 = N_2$.

Себестоимость производства деталей определяют: стоимость материалов Z_m , стоимость технического обслуживания и эксплуатация оборудования Z_o , затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию производственных объектов Z_r , заработная плата основных производственных рабочих Z_p . Рассмотрим механизм формирования этих затрат в системе производственной среды.

В расчете на единицу детали при $N = 1$ материальные затраты определяются величиной расхода материала N_m , стоимость материала P_m , влияние транспортных расходов K_m , стоимость отработанного материала ($N_d \cdot P_d$) [4]:

$$Z_m = N_m \cdot P_m \cdot K_m - N_d \cdot P_d \quad (3.12)$$

Затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию оборудования определяются исходя из стоимости амортизационных отчислений оборудования Z_a , ремонт Z_v оборудования, стоимость оборудования Z_p , стоимость инструментов Z_t , технологические затраты Z_w (2):

$$Z_o = Z_a + Z_v + Z_p + Z_t + Z_w \quad (3.13)$$

Преобразуем выражение (3.13), с учетом общей стоимости всех технологических операций $i = (1 \dots m)$ сравниваются циклы C_1 и C_2 , используются данные из таблицы о количестве оборудования и требуемого персонала. Мате-

матически перегруппировав (3.13), получим (3.14). Параметры выражения (3.13) сгруппированы так, что становится удобно автоматизировать расчеты в дальнейшем, также дается общий знаменатель ($F_m \cdot 100$) - заданное годовое время изготовления детали.

$$Z_{\Sigma 0} = \frac{\sum_{i=1}^m ((P_a \cdot Y_a \cdot T_i) \cdot k_a + (P_v \cdot Y_v \cdot T_i) \cdot k_v + (P_p \cdot Y_p \cdot T_i) \cdot k_p + (P_t \cdot Y_t \cdot T_i) \cdot k_t + (P_w \cdot Y_w \cdot T_w) \cdot k_w)}{F_m \cdot 100} \quad (3.14)$$

где, P_a, P_v, P_p, P_t, P_w -стоимость оборудования, ремонта машин, оборудования, инструментов и технологического процесса затраты, соответственно; Y_a, Y_v, Y_p, Y_w - нормативы затрат на использование оборудования, ремонт оборудования, оборудование, инструментальные и технологические затраты соответственно; T_i, T_t, T_w - это время выполнения технологического оборудования, ремонта, затраты на оборудование, инструменты и технологии соответственно; K_a, K_v, K_p, K_t, K_w -факторы, которые учитывают нагрузку на оборудование, нормы ремонтных работ, расход инструмента, нормы технологических затрат, соответственно; F_m -заданное годовое время изготовления детали. Учитывая все технологические операции $i = (1 \dots m)$ сравниваются циклы C_1 и C_2 , определяется стоимость технического обслуживания и эксплуатации производственных площадей Z_s [4]:

$$Z_{\Sigma S} = \frac{\sum_{i=1}^m ((P_s \cdot Y_s \cdot T_s) \cdot k_s)}{F_m \cdot 100} \quad (3.15)$$

Заработная плата основных производственных рабочих Z_r [4]:

$$Z_{\Sigma r} = \frac{\sum_{i=1}^m ((P_r \cdot T_m) \cdot k_s)}{F_m \cdot 100} \quad (3.16)$$

Давайте представим это обозначение: $F_{\Sigma} = (F_m \cdot 100^{-1})$ (6) и группируя выражения (3.12-3.16) получаем выражение общей себестоимости производства каждой детали (3.17):

$$Z_{\Sigma} = (N_m \cdot P_m \cdot K_m - N_d \cdot P_d) + F_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^m ((P_a \cdot Y_a \cdot T_i) \cdot k_a + (P_v \cdot Y_v \cdot T_i) \cdot k_v + (P_p \cdot Y_p \cdot T_i) \cdot k_p + (P_t \cdot Y_t \cdot T_t) \cdot k_t + (P_w \cdot Y_w \cdot T_w) \cdot k_w + (P_s \cdot Y_s \cdot T_s) \cdot k_s + (P_r \cdot T_m) \cdot k_s) \quad (3.17)$$

Выражение (3.17) позволяет определить влияние технологических “альфа-критериев” производства на себестоимость продукции, цены изготовления единицы продукта. Выполним преобразование (3.17) по отношению к сравниваемым формам организации производства C_1 и C_2 .

$$Z_{\Sigma C1} = (N_m \cdot P_m \cdot K_m - N_d \cdot P_d) + F_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^{18} \left((P_a \cdot Y_a \cdot T_i) \cdot k_a + (P_v \cdot Y_v \cdot T_i) \cdot k_v + (P_p \cdot Y_p \cdot T_i) \cdot k_p + (P_t \cdot Y_t \cdot T_t) \cdot k_t + (P_w \cdot Y_w \cdot T_w) \cdot k_w + (P_s \cdot Y_s \cdot T_s) \cdot k_s + (P_r \cdot T_m) \cdot k_s \right) \quad (3.18)$$

$$Z_{\Sigma C2} = (N_m \cdot P_m \cdot K_m) + F_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^5 \left((P_a \cdot Y_a \cdot T_i) \cdot k_a + (P_v \cdot Y_v \cdot T_i) \cdot k_v + (P_p \cdot Y_p \cdot T_i) \cdot k_p + (P_t \cdot Y_t \cdot T_t) \cdot k_t + (P_w \cdot Y_w \cdot T_w) \cdot k_w + (P_s \cdot Y_s \cdot T_s) \cdot k_s + (P_r \cdot T_m) \cdot k_s \right) \quad (3.19)$$

Очевидно, что выражения (3.17) и (3.18) идентичны. В то же время число операций $i = 18$ для случая C_1 и $i = 5$ для C_2 , согласно (3.19). Отходы $(N_d \cdot P_d)$ также минимизируются для C_2 .

При выполнении имитационного моделирования, предполагающего в первом приближении равные всем значениям параметров в терминах затрат по выражениям (3.18) и (3.19), получаем почти в три раза превышение себестоимости вариантов производства C_1 и C_2

$$Z_{\Sigma C1} \approx 3 \cdot Z_{\Sigma C2} \quad (3.20)$$

Выполнив моделирование во втором и третьем приближениях, введя дифференцированные значения параметров значения затрат по выражениям (3.18) и (3.19), получим избыточные затраты на производство вариантов C_1 и C_2 с возрастающим эффектом в соответствии с неравенством [4]:

$$Z_{\Sigma C1} > Z_{\Sigma C2} \quad (3.21)$$

Таким образом, на основании (3.20) и (3.21) выполняется равенство [4]:

$$T_d = (Z_{\Sigma C2} - Z_{\Sigma C1}) > 0 \quad (3.22)$$

Это ведёт нас к подведению итогов о положительном техническом и экономическом эффекте T_d для приложения предложенного для технологии C_1 .

Этап топологического анализа, как и этап методологии, важен для поиска дополнительных ресурсов и выпуска специалистов и технологического оборудования, как экономическая основа для перехода производства от применения классических технологий к форме использования аддитивные технологии. Следствием этого является снижение затрат на техническое обслуживание и эксплуатацию оборудования. Сокращение площадей производства и персонала, затрат на их содержание. Это то, что делает использование циклов аддитивного производства при изготовлении авиационных деталей более эффективным, чем традиционные циклы. Значительно снижаются производственные, цеховые за-

траты, что позволяет получить значительный технический и экономический резерв в сложности подготовки производства авиационной продукции [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дипломной работы все поставленные цели и требования были достигнуты полностью.

В первую очередь был проведен полный обзор аддитивного производства. В настоящее время в Республике Казахстан внедряются новые технологии, основанные на современных технологиях производства. Кроме того, мы полностью изучили качество печатаемого изделия на 3D принтере. В частности, определяются особенности производства авиационных деталей, их экономическая эффективность и техника безопасности.

Также я разобрал историю создания и классификацию Аддитивных технологий

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
- 2 Александр Зубков Технологии DMT для 3D-печати металлических изделий 2019
- 3 D Levashkin and F Vasilyev Laser-aided direct metal tooling of manufacturing aviation details on CNC machine v 2019 IOP Conf.
- 4 D Levashkin Economic efficiency of the application of additive technologies based on laser direct metal tooling in the production of aircraft parts v 2020 IOP Conf.
- 5 M. Despeisse, S. Ford, The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, UK, ISSN 2058-8887, No.3, June 2015
- 6 I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, DOI 10.1007/978-1-4419-1120-9_2, Springer Science+Business Media, LLC 2010