

**Савиных А.А.**  
студент

**6 курс, факультет «Ракетно-космической техники»  
Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург  
Марк М.А.**  
студент

**4 курс, факультет «Ракетно-космической техники»  
Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург  
Герлейн К.В.**  
студент

**2 курс, факультет «Естественнонаучный»  
Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург  
Костюк С.С.**  
студент

**3 курс, факультет «Ракетно-космической техники»  
Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург  
Погорелов М.А.**  
студент

**4 курс, факультет «Ракетно-космической техники»  
Балтийский государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова  
Россия, г. Санкт-Петербург**

## **ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛЕС НАСОСОВ ТНА**

**Аннотация:** В статье рассматриваются технологии изготовления колес насосов ТНА. Цель работы – обоснование применения крыльчаток в ЖРД, подробное рассмотрение технологий производства крыльчаток и проведение сравнительного анализа полученных результатов. В процессе работы рассмотрены традиционные методы изготовления колес насосов, а

*также аддитивные методы. В результате были выявлены преимущества и недостатки традиционной и аддитивной технологии изготовления крыльчаток, на основании которых произведен дальнейший сравнительный анализ технологий производства изделия.*

**Ключевые слова:** *технология обработки, крыльчатка, насос ТНА, аддитивные и традиционные технологии, механическая обработка, 3d печать.*

**Annotation:** *The article discusses the manufacturing technologies of TNA pump wheels. The purpose of the work is to justify the use of impellers in liquid-propellant rocket engines, to examine in detail the technologies for manufacturing impellers and to conduct a comparative analysis of the results obtained. In the course of the work, traditional methods for manufacturing pump wheels, as well as additive methods, were considered. As a result, the advantages and disadvantages of traditional and additive impeller manufacturing technologies were identified, on the basis of which a further comparative analysis of the product manufacturing technologies was carried out.*

**Key words:** *processing technology, impeller, TNA pump, additive and traditional technologies, mechanical processing, 3D printing.*

## **Введение**

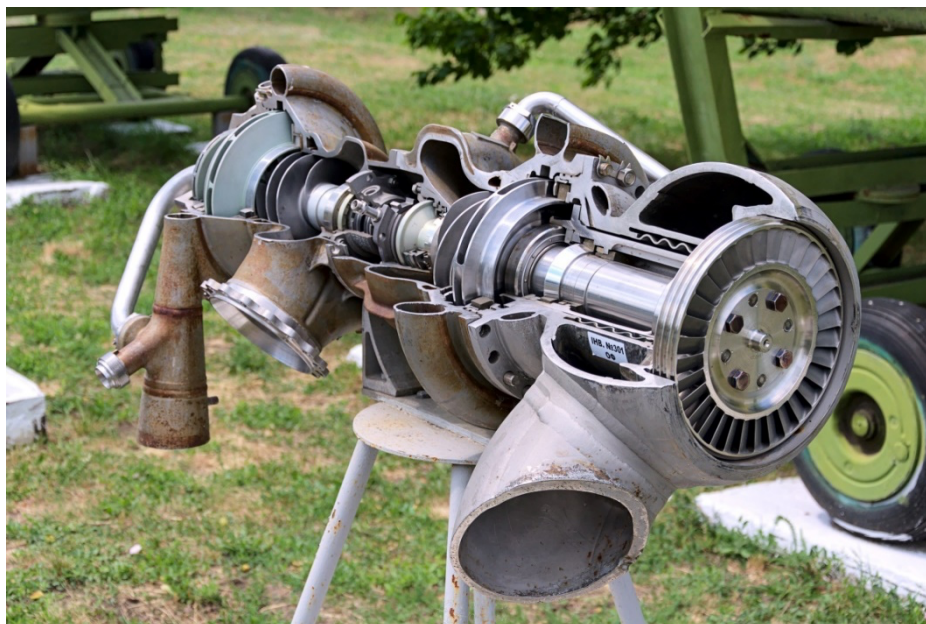
В результате научно-технического бума 20 века, в ходе которого люди побывали в космосе, а предметами обыденности стали автомобили и различная бытовая техника, высокими темпами развивались и технологии производства вновь созданных изделий. Сейчас же для каждого приспособления есть один или несколько вариантов его технологического изготовления, различающихся по степени воздействия на внутренние и внешние характеристики предмета.

В данной работе речь пойдет о производстве крыльчатки турбонасосных агрегатов, применяемых в жидкостных ракетных двигателях.

С целью сравнения рассмотрим традиционную методику и аддитивную технологию изготовления колес насосов ТНА.

## Колеса ТНА

В состав ЖРД с насосной подачей входит турбонасосный агрегат (ТНА). Турбонасосным агрегатом жидкостного ракетного двигателя называют агрегат, предназначенный для насосной подачи топлива в камеру и газогенератор (рис. 1). ТНА обычно состоит из насосов (окислителя и горючего) и приводящих их в действие турбин.



**Рисунок 1. Турбонасосный агрегат**

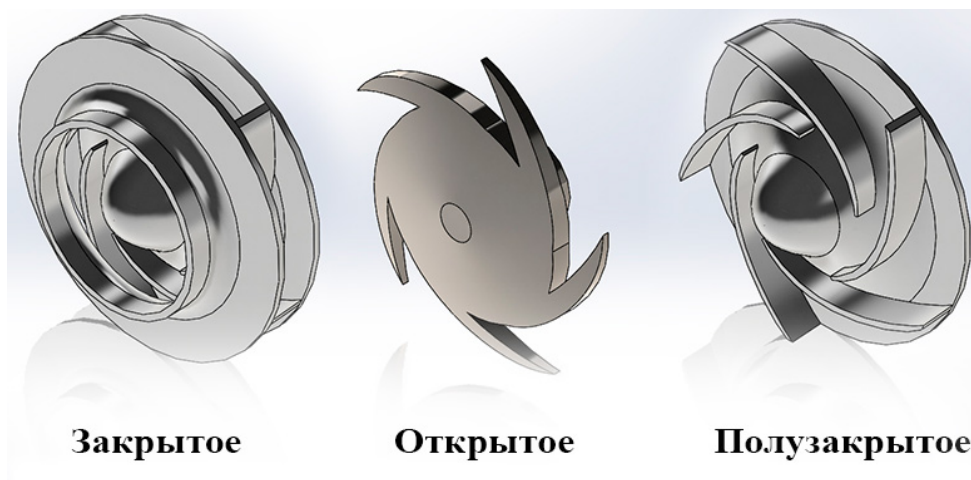
В схемах ЖРД с насосной подачей компоненты топлива подаются из баков в камеру центробежными насосами, приводимыми во вращение турбиной, которые вместе составляют ТНА. Привод турбины осуществляется рабочим телом – генераторным газом. В большинстве случаев генераторный газ вырабатывается в специальной камере – ЖГГ, входящем в состав двигателя.

Основной особенностью всех схем с турбонасосной подачей компонентов является то, что топливные баки во время работы двигателя

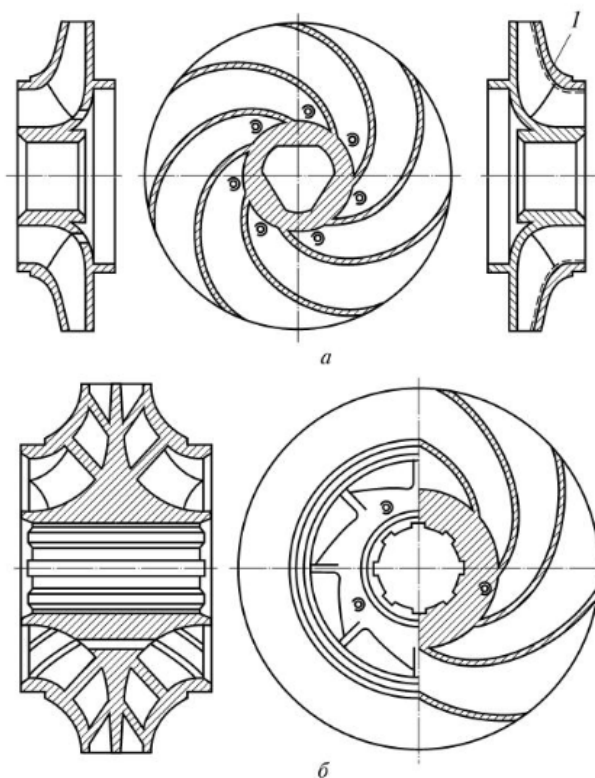
находятся лишь под небольшим избыточным давлением наддува, необходимым для обеспечения бескавитационной работы насосов и не зависящим от давления в камере сгорания. Благодаря этому массовые характеристики баков и систем наддува практически также не зависят от давления в камере [1].

Таким образом, в ТНА устанавливают колеса насосов (крыльчатки) для обеспечения необходимого расхода компонентов топлива, подаваемого в КС под определенным давлением.

В зависимости от схемы насоса, крыльчатки могут быть закрытыми, полузакрытыми и открытыми (рис. 2), а также с односторонним или двухсторонним входом (рис. 3).



**Рисунок 2. Закрытые, полузакрытые и открытые колеса насосов**



**Рисунок 3: а – Конструкция закрытой крыльчатки с односторонним входом; б – Конструкция закрытой крыльчатки с двусторонним входом**

В ТНА обычно применяют крыльчатки закрытого типа с односторонним и двусторонним входом жидкости.

Внутри крыльчаток выполняются направляющие перегородки – лопатки, образующие криволинейные каналы для прохода компонентов.

Крыльчатки закрытого типа имеют сложную конструкцию и включают следующие элементы: ступицу с посадочными местами под соединение с валом; боковые стенки – крышки, между которыми располагаются лопатки; шейки, с поверхностями которых контактируют уплотнения. Внутренние и наружные поверхности боковых стенок и лопатки обладают сложной конфигурацией [2].

### **Традиционная технология изготовления колес насосов**

Традиционная методика изготовления рассмотрена в соответствии с работами [2] и [3].

Крыльчатки работают при большой частоте вращения измеряемые десятками тысяч об/мин (так, например, в РД-119 частота вращения ТНА равняется 21 тыс. об/мин [4]) и испытывают действие агрессивных компонентов топлива. При их изготовлении предъявляют высокие требования к точности размеров, формы и шероховатости поверхностей.

Шейки крыльчаток, испытывающие трение при работе, выполняют либо армированными (например, посредством установки стальных колец на детали из легких сплавов), либо с износостойким покрытием (например, хромирование или глубокое анодирование).

Сложная криволинейная форма каналов в закрытых крыльчатках не позволяет обрабатывать их резанием. Поэтому каналы должны быть получены с достаточной точностью и чистотой поверхности в заготовке. Заготовки такого рода могут быть получены литьем с применением стержней для образования каналов.

Материалы для изготовления закрытых крыльчаток должны обладать хорошими литейными свойствами. Наиболее часто применяются алюминиевые литейные сплавы типа АЛ2, АЛ4, АЛ5, АЛ9, обладающие самыми высокими литейными свойствами (малая линейная усадка, повышенная жидкотекучесть, хорошая герметичность). Они обладают хорошей коррозионной стойкостью и достаточной механической прочностью.

Сборнопаечные крыльчатка выполняются из алюминиевого сплава АВ или из сталей 1Х8Н9Т, 3ОХГСА и других. Заготовки для них получают методом горячего деформирования.

Заготовки закрытых крыльчаток получают литьем в кокиль, в оболочковые формы или литьем по выплавляемым моделям.

При изготовлении крыльчаток небольшими сериями можно применять литье в земляные формы. Во всех случаях стержни для образования каналов должны быть точными и устанавливаться на строго фиксированные опорные элементы для обеспечения заданной точности по взаимному расположению каналов. Наиболее точное фиксирование стержней достигается при литье в

постоянные металлические формы — кокили. При литье в оболочковые формы требуется точная металлическая модель, состоящая из двух половин. Поверхности модели должны быть гладкими — они обычно хромированы и полированы. На поверхность предварительно подогретых до 200—250 градусов Цельсия моделей наносится смесь литейной земли со связующим веществом, например бакелитом (6—8%). По истечении 1,5—2,5 мин на поверхности моделей образуется корка смеси толщиной 10—12 мм. Эти корки-оболочки отделяются от моделей и высушиваются. Параллельно изготавливаются стержни для каналов и литниковая система. Затем производится сборка оболочек, стержней и литниковой системы. Соединение осуществляется склеиванием специальными составами.

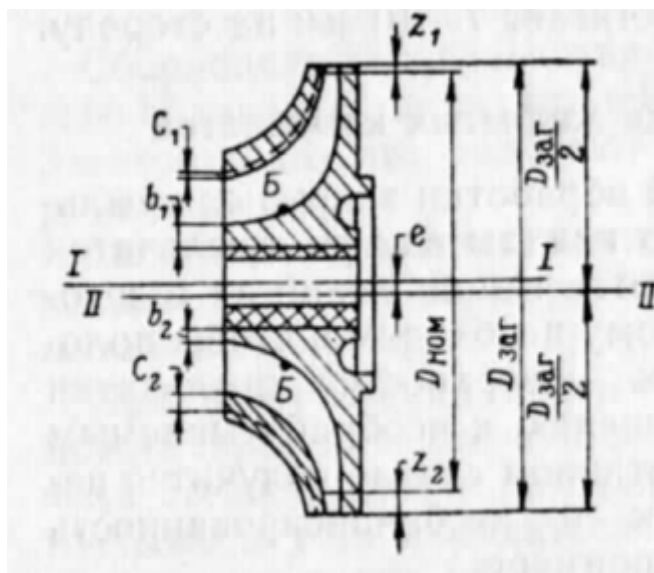
В подготовленную таким образом форму заливается металл.

При расчете припусков на механическую обработку крыльчатки по торцам, периферии и центральному посадочному отверстию следует учитывать не только толщину дефектного слоя, но и погрешность в расположении каналов, так как в первой операции механической обработки базирование крыльчатки должно выполняться обязательно на необработанные внутренние поверхности каналов. Как показывает практика, припуск на механическую обработку заготовок, полученных литьем в кокиль или оболочковые формы, составляет 2—3 мм на сторону. В заготовках, полученных литьем в землю, припуск достигает 7—10 мм на сторону.

Особенности механической обработки закрытых крыльчаток определяются тем, что каналы внутри крыльчаток механически не обрабатываются и положение их в заготовке нельзя изменить. Поэтому необходимо, чтобы положения всех обрабатываемых поверхностей крыльчатки координировались по отношению к необрабатываемым поверхностям каналов. В противном случае получится неравномерная толщина стенок и несбалансированность крыльчатки.

Особенности механической обработки закрытых крыльчаток определяются тем, что каналы внутри крыльчаток механически не

обрабатываются и положение их в заготовке нельзя изменить. Поэтому необходимо, чтобы положения всех обрабатываемых поверхностей крыльчатки координировались по отношению к необрабатываемым поверхностям каналов. В противном случае получится неравномерная толщина стенок и несбалансированность крыльчатки.



**Рисунок 4. Базирование крыльчатки при обработке**

На рисунке 4 показана заготовка крыльчатки номинального наружного диаметра  $D_{НОМ}$ , с припусками на механическую обработку. Геометрическая ось крыльчатки обозначена I-I. Вследствие погрешностей литья припуски могут расположиться неравномерно: с одной стороны припуск  $z_1$ , а с другой –  $z_2$ . Если такую заготовку обрабатывать, базирясь на наружный диаметр  $D_{ЗАГ}$ , то она будет при обработке вращаться вокруг оси II-II, смещенной от оси I-I на эксцентриситет  $e = (z_2 - z_1)/2$ . При этом после расточки посадочного отверстия толщина ступицы будет с одной стороны равна  $b_1$  а с другой –  $b_2$ . Со стороны меньшего припуска ( $z_1$ ) толщина ступицы  $b_1$  будет больше чем  $b_2$ .

В последующей операции при обточке поверхностей крыльчатка будет установлена на посадочное отверстие. Вращение будет происходить вокруг оси II-II, и после обточки деталь получится разностенной, как это показано пунктиром. Толщина  $C_1$  стенки с одной стороны будет меньше толщины  $C_2$  стенки с другой стороны. Следовательно, каналы с одной стороны будут

ближе к оси крыльчатки, чем каналы с другой стороны. Это приведет к неравномерности распределения массы металла, т. е. к дисбалансу, а также ухудшит работу крыльчатки. Изменить это положение в дальнейшем нельзя, так как каналы механически не обрабатываются вследствие чрезвычайной трудности размерной обработки закрытых криволинейных поверхностей.

Чтобы избежать такой погрешности и обеспечить равномерность расположения каналов по отношению к посадочному отверстию, необходимо в первой операции при обработке центрального посадочного отверстия базировать крыльчатку на внутренние необрабатываемые поверхности каналов, например по точкам Б-Б. Тогда ось вращения при обработке будет находиться в середине отрезка Б-Б и, следовательно, все каналы будут расположены на одном расстоянии от оси посадочного отверстия. Неравномерный же припуск по наружным поверхностям будет удален при механической обработке. Толщина ступицы и толщина стенок будут более равномерны.

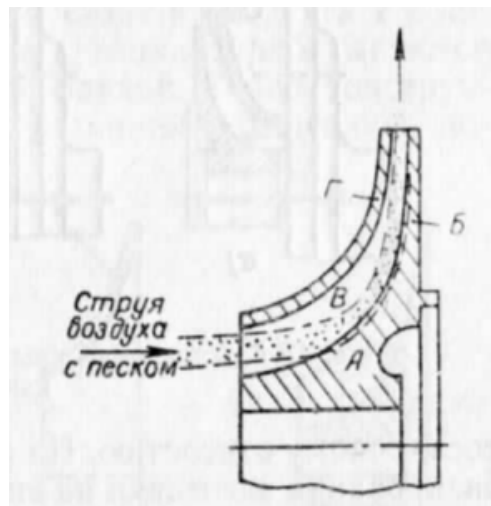
Механическую обработку крыльчаток выполняют в два этапа: черновую и чистовую. При черновой обработке снимается основная часть припуска до 70-80%. Чистовая обработка ведется с менее напряженными режимами резания, крыльчатке придается окончательная форма, а чистота поверхностей доводится до заданной по чертежу. В конце второго этапа проводится балансировка крыльчатки и наносится защитное покрытие.

Типовой технологический маршрут обработки закрытых крыльчаток:

1. Предварительная зачистка каналов;
2. Протачивание торцов и растачивание отверстия;
3. Черновое обтачивание наружных поверхностей;
4. Протягивание шлицев посадочного отверстия;
5. Чистовое обтачивание наружных поверхностей;
6. Протачивание лабиринтных поясков;
7. Сверление отверстий и нарезание резьбы в ступице;
8. Окончательная зачистка каналов;

9. Статическая балансировка;
10. Окончательный контроль;
11. Гальваническое покрытие.

Перед механической обработкой закрытых крыльчаток зачищают внутренние каналы. Способы зачистки выбираются в зависимости от состояния поверхности каналов после литья. На входе и выходе каналы могут зачищаться шарошками, металлическими щетками и другими подобными инструментами. В закрытых местах — середине крыльчатки — такие простые инструменты применять нельзя. Поэтому для зачистки нужны другие средства: обдувка песком – пескоструйная обработка, прокачивание жидкости в смеси с абразивом – гидроабразивная зачистка. Следует иметь в виду, что при пескоструйной или гидроабразивной зачистке металл с поверхности снимается очень интенсивно на изгибах каналов при изменении направления струи. Поэтому в криволинейных каналах в одних местах будут хорошочищенные, а в других — совершенно не зачищенные поверхности. При увеличении длительности зачистки может появиться недопустимо большой сьем металла (рис. 5).



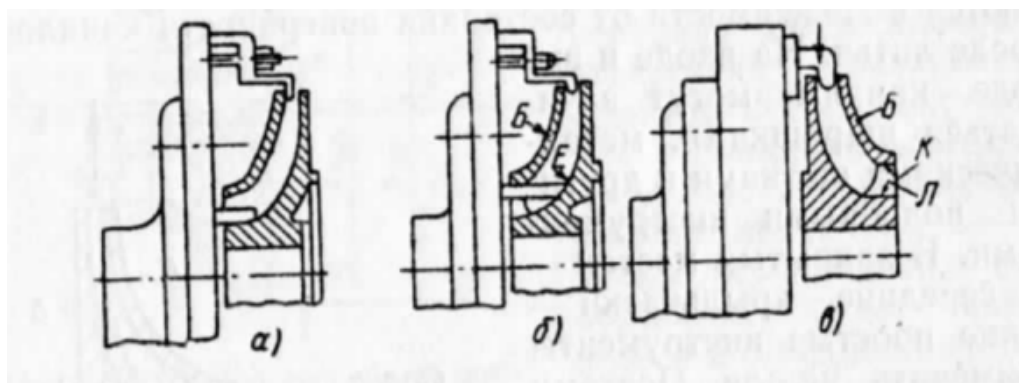
**Рисунок 5. Зачистка внутренних криволинейных каналов крыльчатки**

Струя воздуха с песком или жидкости с абразивом ударяется о стенку и на участке А—Б изменяет свое направление. В результате действия

центробежных сил на этом участке будет интенсивный сьем металла. В то же время противоположная стенка на участке В—Г практически не зачищается.

Для более равномерной зачистки всей поверхности каналов можно использовать обратно-поступательное перемещение гидроабразивной суспензии с малыми скоростями потока или другие способы.

Механическая обработка крыльчатки начинается с подрезки торцов и образования центрального посадочного отверстия. Базой для установки, как указывалось выше, служат внутренние каналы. Базирование может осуществляться на входную или выходную части каналов в зависимости от того, какую из этих частей каналов важнее расположить более точно по отношению к центральному посадочному отверстию.



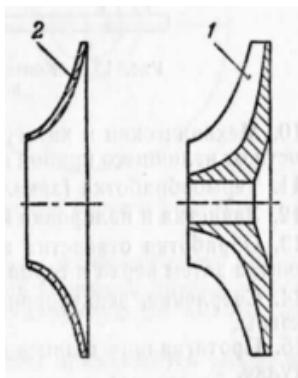
**Рисунок 6. Установка крыльчаток с базированием на каналы**

На рисунке ба базирование проводится на необработанные поверхности трех каналов, прилегающих к ступице, а на рисунке бб — на входную часть каналов, прилегающую к передней стенке Б и одновременно на вторую стенку трех каналов в точках Е. В обеих схемах обрабатываются центральное отверстие и торцовые поверхности. На рисунке бв базирование осуществляется на выходную часть трех каналов. Обрабатываются центральное отверстие, торец и криволинейная поверхность Б. При этой установке могут быть обработаны также входные кромки К и Л.

В дальнейших операциях базирование крыльчатки производится, главным образом, на посадочное отверстие.

Внешняя обработка может выполняться как на токарных, так и на токарно-револьверных станках. В окончательных отделочных операциях базирование должно осуществляться на установочные элементы без зазоров, чтобы избежать погрешностей обработки. Для беззазорной установки применяются конусные оправки с малой конусностью или гидропластмассовые оправки. Обработка должна выполняться на станках повышенной точности, чтобы обеспечить заданную точность: биение уплотнительных поясков по отношению к посадочному отверстию — не более 0,02—0,03 мм; биение наружного диаметра — не более 0,04—0,05 мм.

Сборнопапаяная закрытая крыльчатка схематически изображена на рисунке 7.



**Рисунок 7. Сборнопапаяная крыльчатка**

Она состоит из корпуса 1 с лопастями и крышки 2. Корпус и крышка обрабатываются отдельно, а затем соединяются пайкой. Такая конструкция позволяет обрабатывать резанием внутреннюю полость крыльчатки с высокой точностью и хорошей чистотой поверхности. Примерный план обработки паяных крыльчаток следующий:

1. Протачивание поверхностей корпуса: торцовых, наружных и отверстий. Установочный торец и отверстие для следующей операции точатся с одной установки.
2. Черновое фрезерование лопастей и полок между ними.
3. Чистовое (неокончателное) точение отверстия, торцов и наружных поверхностей.
4. Чистовое фрезерование лопастей и полок между ними.

5. Полирование лопастей и полок.
6. Окончательное протачивание торцов ступицы и лопастей под пайку (по копиру).
7. Проверки прилегания крышки (обточенной по копиру) к корпусу крыльчатки в местах пайки. При зазорах более 0,2 мм крышку необходимо пригнать по корпусу крыльчатки.
8. Наложение и точечная прихватка полосок припоя к крыльчатке и сборка с крышкой в специальном приспособлении (иногда с прихваткой в 4-6 точках электросваркой).
9. Пайка.
10. Механическая и химическая очистка внутренней полости от излишнего припоя и нагара.
11. Термообработка (закалка и старение).
12. Зачистка и полировка каналов.
13. Обработка отверстия и торца корпуса с одной стороны, а затем верха и торца с другой стороны.
14. Сверление, зенкерование отверстий и нарезание резьбы.
15. Протягивание шлицевого посадочного отверстия на втулке.
16. Окончательная обработка корпуса по наружному диаметру и лабиринтных поясков с базированием при обработке на шлицевое отверстие.
17. Зачистка заусенцев, острых кромок и промывка.
18. Защитное покрытие.
19. Окончательный контроль.

Механическая обработка корпусов, крышек и крыльчаток после пайки проводится обычными способами, рассмотренными ранее. Лопасти и полки между ними фрезеруют на копировально-фрезерных станках по объемному копиру.

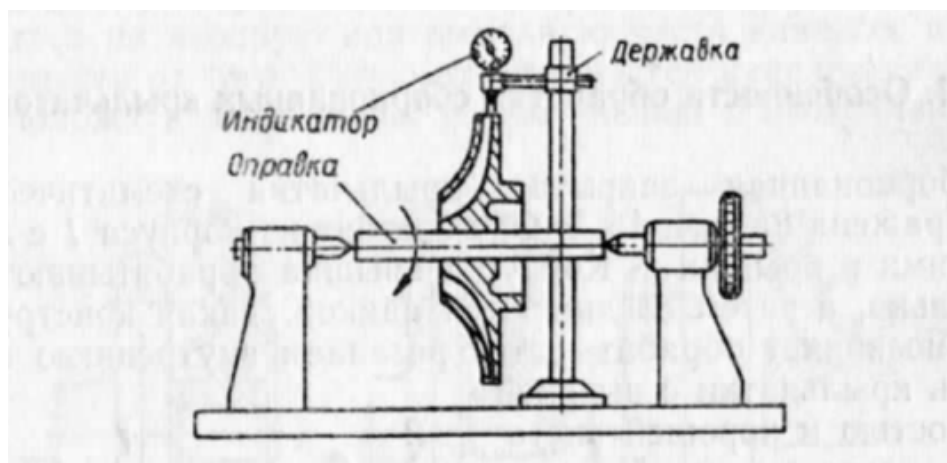
### **Требования к обработке крыльчаток**

Основные требования, предъявляемые к точности и шероховатости крыльчаток при обработке [2]:

- шероховатость поверхности по наружному диаметру —  $Rz = 20$  мкм;
- точность обработки поверхности шеек соответствует 7-му или 8-му качеству, шероховатость от  $Rz = 1,25$  до  $Ra = 0,63$  мкм;
- точность обработки посадочных размеров ступиц — 8-му или 9-му качеству, шероховатость —  $Ra = 2,5 \dots 1,25$  мкм;
- допуск на толщину лопаток составляет  $0,3 \dots 0,5$  мм при шероховатости от  $Rz = 20$  до  $Ra = 2,5$  мкм;
- допуск на толщину стенок на выходе  $0,3 \dots 0,5$  мм;
- допуск на ширину окна на выходе  $\pm 0,3 \dots 1,0$  мм;
- допуск на угловой шаг полостей  $\pm (10 \dots 15)$  мм;
- биение относительно посадочной поверхности наружного диаметра —  $0,03 \dots 0,1$  мм, диаметра шеек —  $0,02 \dots 0,05$  мм, торцов ступицы —  $0,01 \dots 0,03$  мм;
- непараллельность торцов — не более  $0,05$  мм.

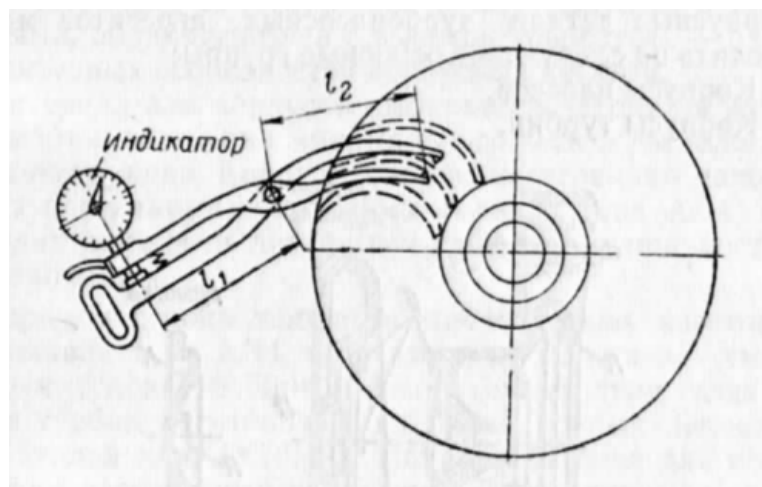
### **Контроль качества обработки крыльчаток**

При окончательном контроле проверяют геометрические размеры крыльчатки, чистоту поверхностей и сбалансированность масс. При контроле биения по уплотнительным поясам и наружному диаметру крыльчатку устанавливают посадочным отверстием на оправку без зазора и вместе с оправкой закрепляют в центрах специального приспособления. Индикатор для измерения величины биения закреплен на стойке, имеющей регулируемую по высоте державку (рис. 8).



**Рисунок 8. Контроль биения поверхностей**

Для контроля толщины стенок применяются различного рода приборы индикаторного типа. На рисунке 9 изображен индикаторный прибор для измерения толщины внутренних лопаток. Он основан на принципе ножниц. Концы приборов изогнуты по конфигурации каналов проверяемой крыльчатки [3].



**Рисунок 9. Прибор для измерения толщины лопаток**

### **Аддитивные технологии**

Основные понятия об аддитивных технологиях рассмотрены в соответствии с работой [5].

К новым технологиям, способным коренным образом улучшить качественные показатели выпускаемых изделий и условия производства в аэрокосмической отрасли, относятся аддитивные технологии, позволяющие

получать трехмерные объекты на основе математической модели изделия. Проектирование деталей с меньшей массой при сохранении их функциональности и физико-механических свойств является одной из основных задач, решаемых в аэрокосмической промышленности. Современное программное обеспечение позволяет оптимизировать геометрию детали, что приводит к эффективному сокращению ее массы. Однако создание изделий сложной геометрии требует больших трудозатрат и материальных вложений, из-за чего использовать методы оптимизации в традиционном производстве иногда бывает нецелесообразно. Аддитивные технологии позволяют получить сложную конструкцию без увеличения стоимости её производства. При этом производство изделий, спроектированных для изготовления по "традиционной" технологии, снижает эффективность применения аддитивных методов из-за завышенного использования материала. Таким образом, оптимизированные детали не только улучшают характеристики ГТД, но и повышают производительность аддитивной технологии.

Аддитивное производство (англ. additive manufacturing) представляет собой класс технологий изготовления деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала.

Процессы, используемые в аддитивном производстве, определяются состоянием применяемых материалов:

- жидкое (полимеры) – стереолитография, послойная наплавка, струйная печать;
- порошкообразное (полимеры, керамика) – 3D-печать, селективное лазерное спекание, селективная лазерная плавка;
- порошкообразное (металлы) – прямое лазерное спекание металлов, электронно-лучевая плавка, прямое нанесение металлов, точное лазерное формование;
- твердое (полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы);

- послойное изготовление объектов из листового материала (листы), произвольное экструзионное формование (проволока).

Уникальные возможности аддитивного производства обеспечивают не только повышение коэффициента использования материалов и высокую точность размеров изготавливаемых изделий без их механической обработки, но и следующие основные преимущества:

- переход от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения как можно большего числа индивидуальных заказчиков), увеличение номенклатуры изделий;

- возможность создания изделий со сложной формой или даже невозможной в обычном производстве конфигурацией;

- сокращение производственных издержек: себестоимости при малых партиях, затрат на электроэнергию, уменьшение размеров производственных площадей за счет исключения ряда технологических операций;

- существенное сокращение длительности производственного цикла, сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;

- резкое повышение гибкости производства, отсутствие необходимости переналадки оборудования под новое изделие;

- упрощение логистики и уменьшение объемов складских запасов;

- персонализация дизайна изделий.

Для нашей работы актуальны технологии прямого лазерного спекания металлов (DMLS), селективного лазерного плавления (SLM) и электронно-лучевая плавка (EBM), так как именно по этим технологиям возможно изготовить натуральный вариант колес насосов ТНА для ЖРД.

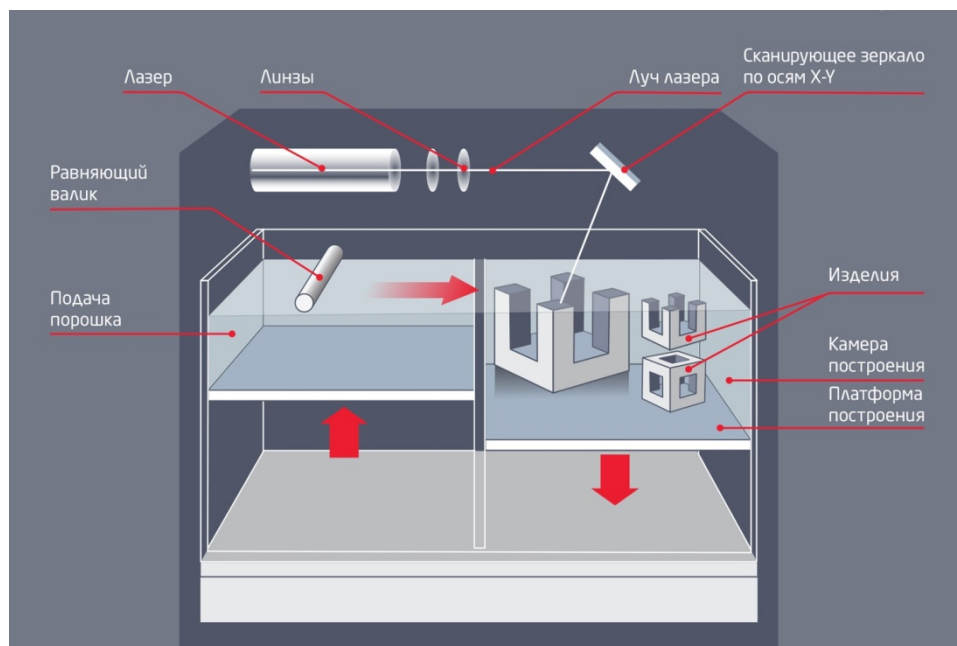
### **Технология прямого лазерного спекания металлов (DMLS)**

Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) – технология аддитивного производства металлических изделий методом спекания [7]. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка 200 Вт (рис. 10).



**Рисунок 10. Принтер с технологией DMLS-печати**

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишки из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью (рис. 11).



**Рисунок 11. Технология 3D-печати**

Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Преимуществами DLMS-технологии являются возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки и безотходность. Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно. Построение моделей занимает несколько часов, что быстрее, чем литейный процесс. Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии намного выгодней, чем за счет традиционных методов.

Недостатком можно считать то, что детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы.

В технологии DMLS могут использоваться практически любые металлы и сплавы в порошковой форме: нержавеющая сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан и др.

### **Технология селективного лазерного плавления (SLM)**



**Рисунок 12. Промышленная SLM установка EOSINT M 280**

Выборочная лазерная плавка (SLM) – метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков [8].

Официальным термином для описания технологии является «лазерное спекание», хотя он несколько не соответствует действительности, так как расходные материалы подвергаются не спеканию, а полной плавке до образования гомогенной массы.

Процесс печати начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои толщиной от 20 до 100 микрон. Готовый файл в стандартном формате STL используется в качестве чертежей для построения физической модели.

Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность – как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (например, аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избежать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка производится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал.

Типичные представители устройств семейства SLM имеют рабочие камеры размером порядка 250мм в одном измерении, хотя технологических ограничений на размер области построения нет. Наиболее популярными материалами являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий, золото и др.

Технология выборочной лазерной плавки применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями.

SLM успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.). Качество готовых изделий настолько высоко, что механическая обработка готовых моделей почти не требуется. Побочным положительным эффектом служит экономия материалов, ибо SLM в силу своей специфики является практически безотходным производством.

### **Электронно-лучевая плавка (EBM)**

Электронно-лучевая плавка («Electron Beam Melting» или EBM) – метод аддитивного производства металлических изделий [9]. Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM) – главное отличие заключается в использовании электронных излучателей (т.н. электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии для плавки. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели. В отличие от технологий спекания, электронно-лучевая плавка позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности.



**Рисунок 13. Промышленная EBM установка производства шведской компании Arcam AB**

Этот метод производства деталей произвольных форм позволяет создавать металлические модели высокой плотности из металлического порошка. Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные с файла,

содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контурные слои модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения. Плавка производится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с материалами, чувствительными к окислению – например, с чистым титаном.

Расходные материалы состоят из чистого металлического порошка без связующего наполнителя, а готовые модели не отличаются пористостью. Таким образом, не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности.

Этот аспект позволяет классифицировать EBM в одном ряду с выборочной лазерной плавкой (SLM) и отдельно от технологии прямого лазерного спекания металлов (DMLS), зачастую требующих обжига после печати для достижения максимальных прочностных характеристик.

Электронно-лучевая плавка проводится при повышенных фоновых температурах, достигающих порядка 700-1000°C, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия – отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига.

Технология получила применение в аэрокосмической отрасли: Boeing, Lockheed Martin и NASA используют EBM для производства деталей реактивных и ракетных двигателей, а также несущих элементов конструкции летательных аппаратов.

### **Установка SLM 500 HL**

SLM 500 HL (рис. 14) – установка селективного лазерного плавления металлов с большой рабочей камерой (500x280x330 мм).

Применяется для единичного и мелкосерийного производства сложных изделий из специальных металлических порошков: нержавеющей и инструментальной стали, алюминиевых, титановых сплавов, инконелей, кобальт-хрома. SLM 500 HL является самой производительной установкой селективного лазерного плавления среди всех форматов SLM-машин, представленных на рынке. Процесс построения изделий полностью автоматизирован и не требует присутствия оператора после запуска машины.

Установка SLM 500 HL, оснащенная сразу 2 или 4 лазерами, позволяет наилучшим образом удовлетворить любые производственные потребности.

Возможность регулировки пятна лазера дает возможность выбирать между максимальной точностью или высокой скоростью построения на простых участках. Базовую версию установки SLM 500HL с двумя (2x400 Вт) лазерами 44 опционально можно усовершенствовать до версии с четырьмя (4x400 Вт) лазерами. 3D-принтер SLM 500 HL способен производить до 105 см<sup>3</sup> металлических изделий в час. Он является флагманом серии и обгоняет по эффективности ближайшую модель среднего формата (SLM 280) в 2 раза. Минимальная толщина стенки —150 мкм. Пятно лазера автоматически регулируется от 80 до 115 микрон, а минимальная толщина слоя составляет всего 20 микрон.



**Рисунок 14. Установка SLM 500 HL**

Данная установка способна изготовить крыльчатку ТНА требуемой точности и объемом около  $80 \text{ см}^3$  примерно за 8 часов.

**Применение аддитивных технологий для изготовления крыльчатки  
ТНА**

На рисунке 15 приведен пример крыльчатки изготовленной при помощи SLM технологии на подобной установке.



**Рисунок 15. Пример крыльчатки изготовленной методикой SLM**

В ходе испытаний NASA было установлено, что детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25, изготовленные из никелевых сплавов методом SLM, несколько уступают по плотности материала аналогам, изготовленным литьем с последующей сваркой компонентов. С другой стороны, отсутствие сварочных швов благоприятно влияет на прочность изделий.

Пробной деталью при проверке возможностей 3D-печати была крыльчатка насоса, изготовленная по заказу ГП «КБ «Южное» во внешней организации из алюминиевого сплава AlSi10Mg. Напечатанная на 3D-принтере заготовка прошла механическую обработку и хромирование уплотнительных буртов. Внутренние поверхности крыльчатки, образующие проточную часть, никакой обработке не подвергались. В соответствии с существующей штатной технологией производились сборка насоса и его испытания со снятием характеристик при прокачивании воды с приводом насоса от стендового электродвигателя. Полученные характеристики сравнивали с характеристиками насосов, в которых была установлена крыльчатка такой же геометрии, но изготовленная по традиционной технологии (литье по выплавляемым моделям). Было определено, что коэффициент полезного действия насоса с крыльчаткой, изготовленной методом 3D-печати, на 2-3% выше, чем насоса с литой крыльчаткой. Такой выигрыш можно объяснить тем, что при 3D-печати точнее воспроизводится расчетная геометрия проточной части и поверхность более шероховатая, чем у литой крыльчатки. Двигатель РД861К с крыльчаткой, напечатанной на 3D-принтере, успешно прошел серию огневых испытаний, наработав тройной ресурс как по времени работы, так и по количеству включений. По результатам дефектации после испытаний замечаний к крыльчатке нет.

## **Заключение**

В ходе работы мною были установлены следующие достоинства применения аддитивных технологий в производстве крыльчатки ТНА для ЖРД:

- переход от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения как можно большего числа индивидуальных заказчиков), увеличение номенклатуры изделий;

- сокращение производственных издержек: себестоимости при малых партиях, затрат на электроэнергию, уменьшение размеров производственных площадей за счет исключения ряда технологических операций;

- существенное сокращение длительности производственного цикла, сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;

- резкое повышение гибкости производства, отсутствие необходимости переналадки оборудования под новое изделие;

- упрощение логистики и уменьшение объемов складских запасов;

Таким образом, стоит признать тот факт, что применение аддитивных технологий на данном этапе своего развития уже дает однозначное преимущество в сравнение с традиционными методиками изготовления. Однако, в результате рассмотрения различных методик изготовления колес насосов (как аддитивных, так и традиционных) для меня стало очевидно, что главный плюс изготовления деталей методами 3D-печати – это возможность безграничной разработки геометрии изделия, позволяющая производить новые формы каналов с улучшенными аэродинамическими характеристиками и, как следствие, улучшенными показателями работы двигателя в целом.

#### **Использованные источники:**

1. Анискевич Ю.В., Левихин А.А. Основы устройства и теории ЖРД / Балтийский государственный технический университет – СПб., 2016. 118 с.

2. Моисеев В.А., Тарасов В.А., Калмыков В.А., Филимонов А.С. Технология производства жидкостных ракетных двигателей /М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015 – 379 с.
3. Горев И.И. Основы производства жидкостных ракетных двигателей / М.: Машиностроение. 1969 – 357 с.
4. Матвеев Н.К., Семенов А.А. Устройство двигателя РД-119 / Балтийский государственный технический университет – СПб., 2020. 47 с.
5. Побелянский А.В., Левихин А.А. Проектирование авиационных и ракетных двигателей с применением CAD/CAM/CAE – систем / Балтийский государственный технический университет – СПб., 2019. 62 с.
6. Воробей В.В., Логинов В.Е. Теоретические основы проектирования технологических процессов ракетных двигателей. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Ракетные двигатели" направления подготовки "Двигатели летательных аппаратов" / Сер. Авиация и космонавтика. (Изд. 2-е, перераб. и доп.) Москва, 2007.
7. Технология прямого лазерного спекания металлов (DMLS) – URL: [https://3dtoday.ru/wiki/DMLS\\_print](https://3dtoday.ru/wiki/DMLS_print)
8. Технология выборочного лазерного плавления (SLM) – URL: [https://3dtoday.ru/wiki/SLM\\_print](https://3dtoday.ru/wiki/SLM_print)
9. Технология электронно-лучевой плавки (EBM) – URL: [https://3dtoday.ru/wiki/EBM\\_print](https://3dtoday.ru/wiki/EBM_print)