

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ
ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОДК-САТУРН»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора –
управляющий директор

_____ В. А. Поляков

« _____ » _____ 2023 г.



Конкурсная работа

в номинации «Лучший инновационный проект»
в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2022 года
«Создание технологического процесса гибридной аддитивной штамповки»

Рыбинск, 2023

Содержание

1. Введение	3
2. Цель работы	3
3. Актуальность работы	3
4. Краткое описание работы.....	4
5. Результаты и практическая значимость выполненных работ.....	5
6. Заключение.....	13

1. Введение

В контуре АО «ОДК», для формообразования сложно профильных заготовок из титановых сплавов, таких как лопатки ГТД, широко применяется изотермическая штамповка, обеспечивающая требуемую заполняемость гравюры штампа и уменьшение последующего коробления вследствие влияния возникающих внутренних напряжений. Разработка и внедрение в серийное производство бесприпусковой штамповки лопаток ГТД сопровождается большим объёмом технологической подготовки производства, изготовлением дорогостоящей ковочной оснастки с длинным циклом изготовления: высадочные штампы, вальцовочные вставки, ковочный и калибровочный изотермические штампы, обрезной штамп.

На ПАО «ОДК-Сатурн» номенклатура деталей, изготавливаемая по данной технологии, включает более 20 позиций, включая четыре вида лопаток двигателя SaM146, изготавливаемых бесприпусковой изотермической штамповкой. Серийное производство фасонированных заготовок под изотермическую штамповку связано со следующей проблематикой:

- высокая стоимость и длительность цикла ТПП (изготовления штампов, оснастки и т.д.)
- необходимость доработки штамповой оснастки по результатам проведения опытных работ при апробации технологии, отработке техпроцесса;
- продолжительное время настройки операции «Высадка» и «Вальцевание», так как горизонтально-ковочная машина и ковочные вальцы трудоёмки в наладке и не обеспечивают стабильность процесса;
- длительность цикла изготовления заготовок, связанная с большим количеством операций;
- повышенный процент отбраковки и затрат на технологические нужды из-за нестабильности процессов высадки и вальцовки;
- большая трудоёмкость межоперационных работ, по зачистке, выполняемых вручную.

2. Цель работы

Оптимизация технологии производства фасонированных заготовок с применением селективного электронно-лучевого сплавления.

Снижение потерь связанных с нестабильным производством фасонированных заготовок для штамповки лопаток из титанового сплава

3. Актуальность работы

Традиционная технология штамповки не позволяет получать фасонированные заготовки со стабильной геометрией и с сохранением требуемого объёма материала, ввиду необходимости использования ручной зачистки поверхностных дефектов.

Группой специалистов ПАО «ОДК-Сатурн» в области изотермической штамповки, аддитивных технологий и металлургии была сформулирована техническая идея, реализация которой должна позволить решить указанные проблемы традиционной технологии штамповки путем применения, в качестве формообразующей технологии фасонированных заготовок из

титанового сплава аддитивную технологию – селективного электроннолучевого сплавления (СЭЛС) металлопорошковой композиции (МПК). В целом, процесс получил название “Гибридная аддитивная штамповка”. Практическая апробация проведена на базе отработанного серийного процесса штамповки лопаток направляющего аппарата одного из серийно выпускаемых двигателей из титанового сплава ВТ6 под безразмерную обработку профиля пера. Этот серийный техпроцесс максимально изучен и имеет большой объем статистических данных, необходимых для сравнительного анализа.

Аддитивная технология электроннолучевого сплавления имеет ряд преимуществ перед другими аддитивными технологиями высокого уровня технологической готовности. Процесс СЭЛС проводится в вакууме при высокой мощности излучения и высоких температурах рабочей зоны (до 1000 °С), что позволяет синтезировать детали с минимальными внутренними напряжениями, отсутствием пор и высоким качеством микроструктуры. Также, эта технология имеет высокую производительность, минимальную стоимость и высочайшее качество используемой МПК (за счет использования порошка высокого фракционного состава, получаемого по технологии центробежной атомизации).

Данные разработки на текущий момент не коммерциализованы, готовые решения на рынке отсутствуют, объекты и примеры внедрения в серийное производство в авиадвигателестроительной отрасли неизвестны, но ведущие мировые компании GE, Safran и т.д. проявляют большой интерес к подобной технологии. Далее представлено описание выполненной работы и анализ полученных результатов.

4. Краткое описание работы

Для реализации технической идеи процесса «гибридной штамповки» специалистами ПАО «ОДК-САТУРН» в областиковки и аддитивного производства была сформирована комплексная программа проведения опытных работ и исследований, направленная на решение ряда важных технологических и экономических проблем связанных с отработкой и внедрения в производство разработанной технологии «гибридной штамповки».

Разработанная программа направлена на отработку технологии получения заготовок, с необходимой внутренней структурой материала, удовлетворяющей требованиям стандартов, геометрии, объему, шероховатости. Проведен анализ прочностных характеристик и сравнение экономических показателей процессов традиционной и «гибридной технологии» технологии.

В настоящее время на ПАО «ОДК-Сатурн» для производства штамповок лопаток направляющего аппарата из титанового сплава ВТ6 применяются следующие операции с применением 6 штампов и 8 ковочных операций (согласно технологии получения заготовок):

- 1) *получение фасонированной заготовки под изотермическую штамповку*
- резка мерных заготовок;
 - нагрев и высадка на горизонтально-ковочной машине (ГКМ), 1,2 переход;
 - обдувка и зачистка поверхностных дефектов и зажимов после ГКМ;

- нагрев и высадка на ГКМ, 3,4 и 5 переходы;
- обдувка и зачистка поверхностных дефектов и зажимов после ГКМ;
- нагрев и высадка на ГКМ, 6 переход;
- обдувка и зачистка поверхностных дефектов и зажимов после ГКМ;
- нагрев и вальцовка стержневой части;
- обдувка и зачистка поверхностных дефектов;

2) *получение штамповки лопатки методом изотермической штамповки*

- нагрев и изотермическая штамповка;
- обрезка облоя;
- нагрев и изотермическая калибровка;
- термообработка
- размерное травление;
- нагрев и термофиксация.

Исходя из геометрических параметров штамповки, переходы высадки, вальцевания деформируемой цилиндрической части и изотермической штамповки смоделированы в программном обеспечении - QForm 3D, широко применяемом при моделировании процессовковки и разработки ТП для получения заготовки. Расчёт параметров переходов высадки выполнен на *предельных значениях устойчивости стержня к деформациям металла с учётом применения операции «Высадка»*. Это связано со сложной геометрией штамповки лопатки, значительным перепадом сечений в зоне перехода от тонкого профиля пера к хвостовику лопатки.

Существующая, серийная технология изготовления фасонированных заготовок лопаток под изотермическую штамповку связано со следующей проблематикой:

- длительный цикл изготовления фасонированных заготовок, в связи с большим количеством переходов и настройки оборудования (ГКМ);
- достаточно большой процент отбраковки и затрат на технологические нужды;
- высокая трудоёмкость межоперационных зачистных работ, выполняемых вручную (слесарная обработка, зачистка и т.д.).
- особенности процесса и имеющегося оборудования не позволяют получать фасонированные заготовки со стабильной геометрией и требуемым объёмом металла.

5. Результаты и практическая значимость выполненных работ

В связи с вышеперечисленной проблематикой процесса, техническими специалистами ПАО «ОДК-Сатурн» разработана технология “Гибридной штамповки” с получением фасонированной заготовки аддитивными технологиями (АТ) из сплава ВТ6.



Рисунок 1 – Процесс получения фасонированной заготовки

Для получения фасонированной заготовки предложено использовать процесс селективного электронно-лучевого сплавления (СЭЛС), который протекает в вакууме при высоких температурах (подогрев нанесенного слоя, стабильная температура в рабочей зоне), достигающих порядка 850°C. Мощность электроннолучевой пушки составляет 3 кВт, что позволяет значительно ускорить процесс (примерно в 3 раза по сравнению с селективным лазерным сплавлением) благодаря большим энергозатратам при расплавлении металлического порошка. Совокупность этих особенностей процесса и разработка оптимальных технологических параметров синтеза позволяет получать заготовки максимальной плотности (стремится к 100%) с высочайшими прочностными характеристиками (значительно превышающими свойства литой заготовки, и в отдельных случаях, превышающими свойства ковальной). К данным показателям на текущий момент не может приблизиться, ни одна из аддитивных технологий формообразования, имеющих на рынке.

В технологии СЭЛС применяется порошок крупной фракции (45-105 мкм), полученный по технологии PREP (Plasma Rotating Electrode Process). Порошок, полученный по данной технологии, имеет стоимость значительно ниже (приблизительно на 30 %) чем порошки, произведенные по технологии газовой атомизации, применяемые в процессах селективного лазерного синтеза на подложке.

В обеспечение разработки и внедрения технологии электроннолучевого сплавления в цепочку создания ценностей, ПАО «ОДК-Сатурн» на протяжении пяти лет проведена огромная работа. Технология обеспечена материалом (металлопорошковой композицией, далее МПК) отечественного производства ВТ6 разработанной ПАО «ОДК-Сатурн» в рамках программы импортозамещения. Синтезированный материал в 2020 году прошел общую квалификацию (паспортизацию) в ВГУП ФИАМ и внесен в ограничительный перечень материалов рекомендуемых к применению в авиадвигателестроении. Серийное производство МПК, по ТЗ и ТУ ПАО «ОДК-Сатурн», освоено ведущими отечественными предприятиями порошковой металлургии, такими как СМК, Композит и др.

Применение технологии селективного электроннолучевого сплавления регламентируется:

ГОСТ Р 58419-2019 “Аддитивные технологии. Изделия из титановых сплавов, изготовленные методом селективного электронно-лучевого сплавления. Общие технические условия”

ГОСТ Р 58418-2019 “Аддитивные технологии. Металлические порошки и проволоки. Виды дефектов. Классификация, термины и определения”

Указанные ГОСТы являются совместной разработкой ПАО «ОДК-Сатурн» и АО «Композит», утверждены и внедрены в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 мая 2019г. № 223-ст.

Получение фасонированных заготовок методом электронно-лучевого сплавления:

Замена традиционных операций высадки и вальцевания на изготовление фасонированных заготовок лопаток (полуфабрикатов) под изотермическую штамповку методом СЭЛС позволяет:

- получать высокоточную и стабильную (повторяемость) геометрию фасонированной заготовки, максимально приближенную к идеальной, расчетной (смоделированной) в QForm 3D, что позволит выполнять операцию окончательной штамповки без дефектов и исключить операций зачистки;
- повысить КИМ за счет снижения нормы расхода материала, в связи с отсутствием отходов металла при проведение зачистных работ;
- получить микроструктуру материала лопаток с равномерным глобулярным ($\alpha+\beta$)- строением и отсутствием альфированного слоя;
- снизить общее количество операций, задействованного оборудования и подразделений участвующих в процессе получения заготовки;
- сократить время и стоимость технологической подготовки производства.

Для изготовления фасонированных заготовок выполнено оптимальное расположение (для снижения времени синтеза и максимального заполнения рабочего пространства) математической модели заготовок в пространстве (30 штук), изготавливаемых за одну садку в течение 18 часов в полностью автоматическом режиме.

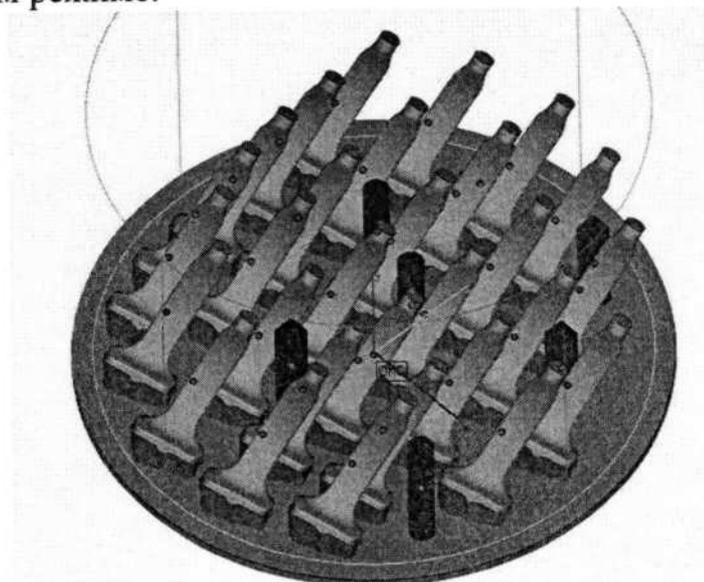


Рисунок 2 – Расположение заготовок на платформе

После получения партии фасонированных заготовок происходит отделение поддерживающих структур вручную, простейшими слесарными инструментами и зачисткой поверхности контактируемой с поддержками.

Получаемые после слесарной обработки заготовки имеют грубую шероховатость ($Ra\ 6,3$), не соответствующую требованиям, предъявляемым к фасонированным заготовкам для изотермической штамповки. Шероховатость бесприпускового профиля штамповок лопаток закладывается на стадии изготовления фасонированных заготовок.

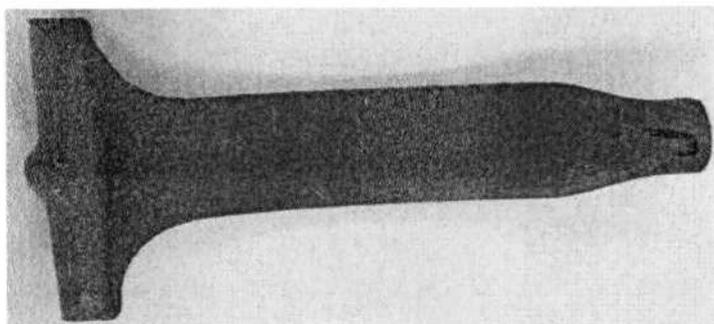


Рисунок 3 – Фасонированная заготовка под изотермическую штамповку из синтезированной титановой МПК методом СЭЛС.

Для снижения шероховатости синтезированных заготовок отработаны технологии виброгалтовки, гидроабразивной и электро-химической обработки, которые обеспечивают получение требуемой шероховатости.

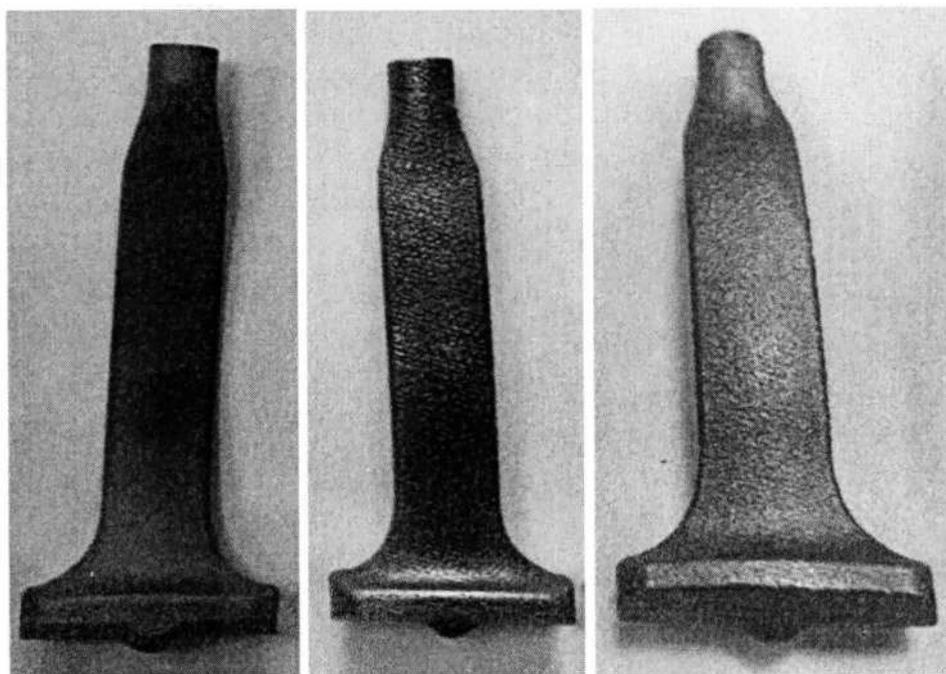


Рисунок 4 – Фасонированные заготовки под изотермическую штамповку с гидроабразивной обработкой, виброгалтовкой и электро-хим. полировкой (слева на право)

Основным критерием для выбора технологии получения требуемой шероховатости используемой в технологическом процессе стали минимальные трудозатраты на проведение операции и как следствие ее минимальной стоимости в структуре цены.

Таблица 1 – Затраты на доведение шероховатости поверхности

Технология	Затраты времени, н/ч	Итоговая шероховатость, Ra
Виброгалтовка	0,06	1,2
Гидроабразивная обработка	0,09	2,5
электрохимическая обработка	0,5	<0,8

Оптимальной технологией получения требуемой шероховатости поверхности синтезируемой по технологии СЭЛС фасонированной заготовки для бесприпусковой изотермической штамповки является виброгалтовка, операционные затраты минимальны, качество поверхности удовлетворяет требованиям, предъявляемым к фасонированной заготовке.

Методики контроля и требования, предъявляемые к заготовке полученной СЭЛС, аналогичны применяемым при традиционном способе получения заготовки.

Дальнейшие операции штамповки лопаток проводились по режимам утверждённого серийного технологического процесса: изотермическая штамповка, обрезка, изотермическая калибровка, термообработка, размерное травление.

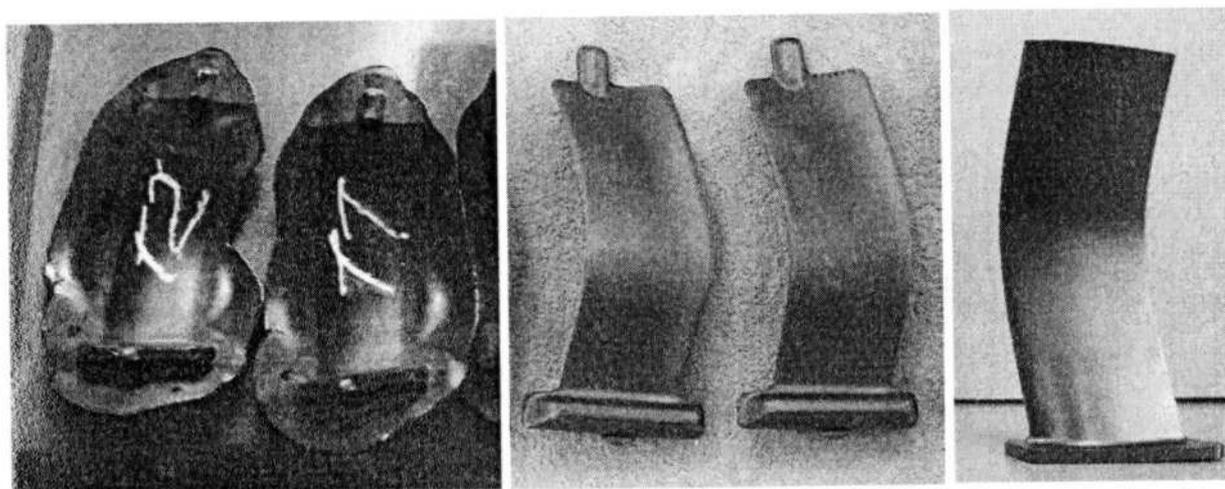


Рисунок 5 – штамповки лопаток, штамповки лопаток после обрезки облоя, обдувки и травления, лопатка, полученная после механической обработки гибридной штамповки.

Исследования и испытания

Для оценки микроструктуры материала из пера заготовки лопатки были изготовлены микрошлифы в осевом направлении и в направлении роста заготовки (см. рисунок 6).

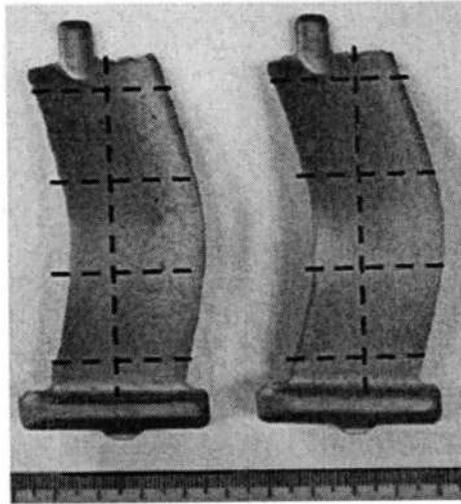


Рисунок 6 – Гибридная аддитивная штамповка, с указанием схемы разрезки для изготовления микрошлифов

Анализ микроструктуры материала гибридных штамповок лопаток показал следующее:

- материал плотный, пористости и каких-либо других несплошностей не выявлено (см. рисунок 7);
- альфированного слоя не выявлено;
- металлургических дефектов типа пор, неметаллических включений, заковов в микроструктуре материала не наблюдается;
- микроструктура материала имеет мелкозернистое равноосное глобулярное ($\alpha+\beta$) - строение.

Данная структура характерна для лопаток, изготавливаемых методом изотермической штамповки, и соответствует требованиям НТД (см. рисунок 8).

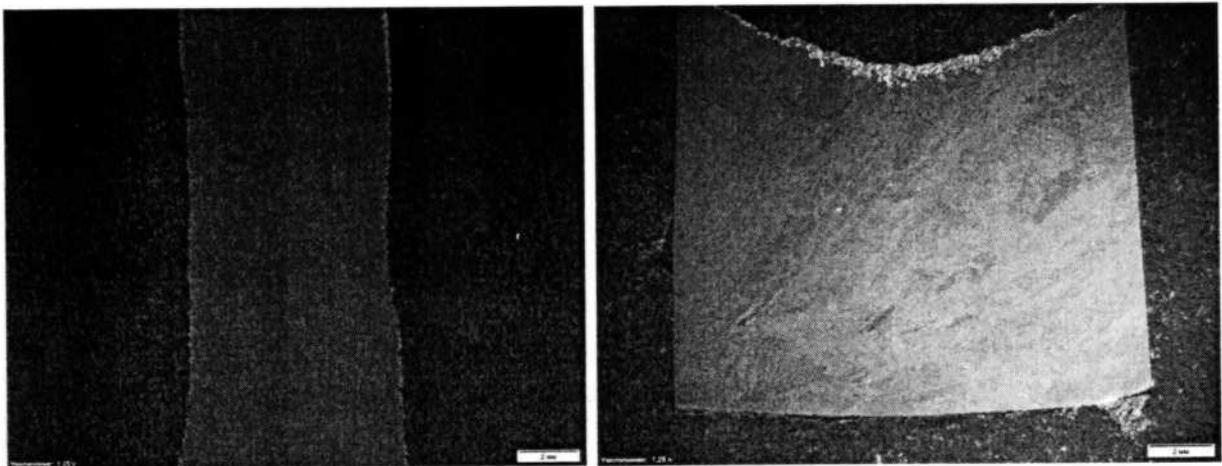


Рисунок 7 – Травленные микрошлифы гибридной заготовки

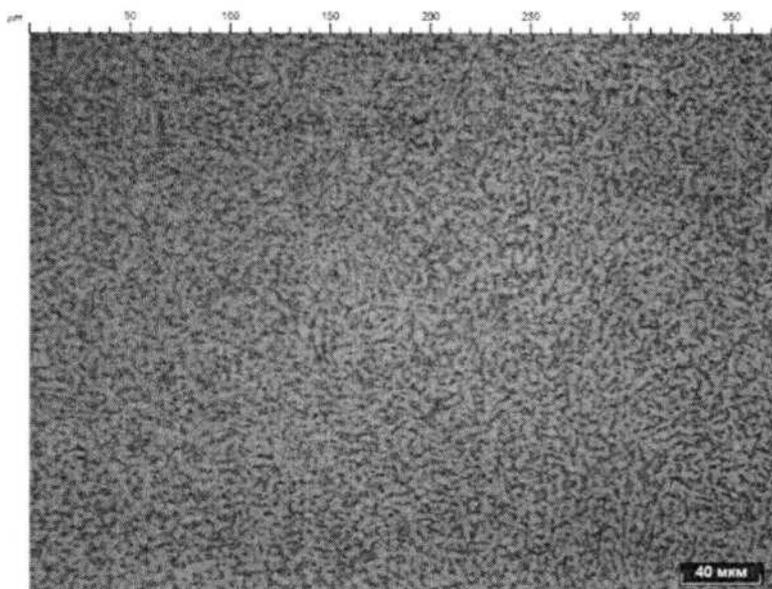


Рисунок 8 - Микроструктура материала штамповок лопаток

Получаемый материал, с дисперсным глобулярным строением обладает высокими прочностными характеристиками (ударной вязкостью, усталостной прочностью, пределом прочности, пределом текучести и относительным удлинением) полностью соответствует требованиям НТД.

Для определения механических свойств из замков штамповок лопаток были изготовлены образцы.

По результатам испытаний механические свойства полностью составляют:

- временное сопротивление $\sigma_B = 105 \text{ кг/мм}^2$ при норме ≥ 92 ;
- предел текучести $\sigma_{0,2} = 105 \text{ кг/мм}^2$ при норме ≥ 85 ;
- относительное удлинение $\delta = 13\%$ при норме ≥ 10 ;
- относительное сужение $\psi = 34\%$ при норме ≥ 25 .

Согласно требованиям, предъявляемым к лопаткам, получаемым традиционной технологией были проведены испытания с целью определения усталостной прочности лопаток изготовленных по опытной технологии.

Задача: подтверждение предела выносливости на уровне 260 МПа.

Форма испытаний: основной тон, комнатная температура, база испытаний - 20 млн. циклов.

Таблица 2- Результаты усталостных испытаний лопаток полученных по опытной технологии.

№ лопатки	σ_a , МПа	f, Гц	$N \times 10^{-6}$, циклов	Результаты ЛЮМ-контроля
1.	260	452	20,0	Не разрушились
2.		446		
3.		453		
4.		453		
5.		445		
6.		452		

Предел выносливости опытных лопаток, полученных по технологии «Гибридной штамповки» при колебаниях по основному тону по контрольному тензодатчику на базе 20 млн. циклов при комнатной температуре подтверждён на уровне требуемых 260 МПа.

Сравнительный анализ классической технологии получения заготовки и технологии с применением аддитивных технологий

Сравнения затрат на получение фасонированной заготовки с учетом технологической подготовки при классической технологии и гибридной технологии представлено в таблице 3.

Технология получения	Процент потерь на технологические нужды и брак	Количество операций	Цикл изготовления оснастки	Количество задействованной штамповой оснастки, шт	Стоимость технологической подготовки, руб.	Стоимость изготовления одной заготовки при партийности в 100 деталей, руб	Стоимость изготовления одной заготовки при партийности в 1000 деталей, руб
Классическая технология (штамповка)	8%	15	3 месяца	2	420 000	4671	891
Аддитивные технологии	< 1%	9	Оснастки не требуется	Необходимость в оснастке отсутствует	ТПП не требуется	871	871
Получаемый эффект	>7%	-6	-3 месяца	-2	-420 000	-3800	-20

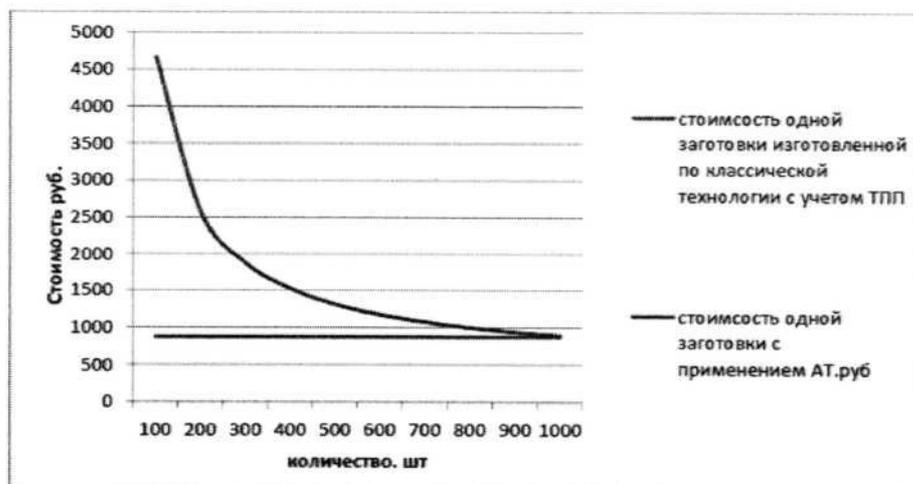


Рисунок 9 – График зависимости стоимости изготовления фасонированных заготовок в зависимости от партийности.

Себестоимость изготовления одной фасонированной заготовки получаемой традиционными технологиями в виду значительной стоимости ТПП чрезвычайно зависима от требуемого объема производства, так при партии в 100 деталей, себестоимость составляет 4671 рубля за штуку, в то время, как при объеме производства в 1000 штук, себестоимость составляет - 891 рублей за штуку. Стоимость фасонированной заготовки получаемой аддитивными технологиями не зависит от партийности и составляет 870 рублей за штуку. При сравнительном расчете себестоимости фасонированных заготовок получаемых традиционной технологией использовался ряд допущений, например - не учитывалась стойкость штампа (необходимость его

замены либо ремонта после выпуска определенного количества заготовок), что потенциально, еще больше повышает экономическую привлекательность разработанной технологии «гибридной штамповки». Также, в виду отсутствия методик расчета, не учитывались: - экономический эффект от сокращения цикла ТПП на три месяца; - высвобождение средств производства и человеческих ресурсов связанных с уменьшением количества операций (переходов) техпроцесса с 15 до 9.

6. Заключение

Разработанная технология «Гибридная аддитивная штамповка» позволяет получить продукт полностью соответствующий требованиям НТД.

Использование аддитивных технологий для производства фасонированных заготовок под изотермическую штамповку лопаток (на примере лопаток направляющего аппарата) позволяет:

- снизить себестоимость изготовления заготовок;
- оптимизировать технологический процесс (снижение технологических операций с 15 до 9);
- исключить затраты на технологическую подготовку производства для изготовления фасонированных заготовок;
- сократить общие сроки технологической подготовки производства за счет исключения производства штамповой оснастки для получения фасонированных заготовок
- снизить процент потерь на технологические нужды и брак в 8 раз;
- снизить в 1,5 раза количество технологической штамповой оснастки при производстве бесприпусковой штамповки лопатки с 6 единиц при классической технологии до 4 с применением электронно-лучевого сплавления при получении фасонированной заготовки.

Применение АТ при получении фасонированных заготовок на текущий момент целесообразно использовать для получения опытных деталей, при отработке ТП, а также деталей небольшой серийности. В дальнейшем, в виду тенденции к снижению относительной стоимости металлопорошковых композиций, данная технология сможет конкурировать с традиционными технологиями (вне зависимости от серийности изготовления) и ремонтными технологиями (себестоимость изготовления новой детали по технологии «гибридная аддитивная штамповка» может быть соизмерима со стоимостью отремонтированной детали).

По технологии «Гибридная аддитивная штамповка» ПАО «ОДК-Сатурн» получен патент на изобретение №2760328.

В 2022 году на Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД 2022» по данной работе получена серебряная медаль.

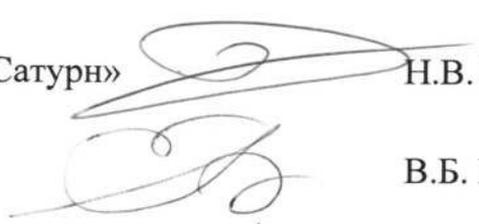
Даная разработка носит инновационный характер и показывает возможности получения максимального синергетического эффекта от комбинаций традиционных технологий и так называемых «прорывных», перспективных, к которым по праву относятся аддитивные технологии.

Патент и медаль «Архимед».

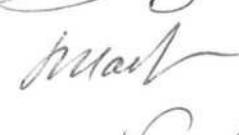


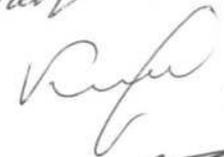
Рисунок 10 – Патент №2760328 и серебряная медаль «Архимед».

Коллектив авторов:

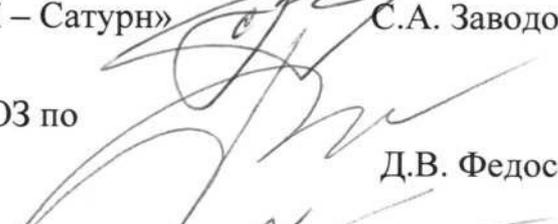
Главный кузнец ПАО «ОДК – Сатурн»  Н.В. Рассудов

Начальник КТС ШЛ ОГКузн  В.Б. Быстров

Ведущий специалист ОГКузн  М.А. Шаброва

Ведущий инженер – технолог ОГКузн  Р.А. Казаков

Главный инженер ОЗ ПАО «ОДК – Сатурн»  С.А. Заводов

Заместитель главного инженера ОЗ по
аддитивным технологиям  Д.В. Федосеев

Начальник отдела аддитивных технологий ОЗ  П.Ю. Козляков