

## **ОБОБЩАЮЩИЙ ОТЧЕТ**

### **«Внедрение аддитивных технологий в производство аэродинамических моделей и экспериментальных конструкций»**

Представляется на конкурс «Авиастроитель года»  
в номинации: «За создание новой технологии», 2023 год

Авторы: Балашов С.М., Вермель В.Д., Дюг А.Ю., Зиняев В.В.,  
Казимилова А.Н., Мотягин М.О., Шардин А.О., Юстус А.А.

Жуковский, ФАУ «ЦАГИ» им. Н.Е. Жуковского

2024 год

## Реферат

Отчет: стр.42, рис.28, таблиц 3, список материалов по теме 20.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ТИПОВЫЕ И ОСОБО СЛОЖНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ, ОБОРУДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЛАВЛЕНИЕ (SLM-ТЕХНОЛОГИЯ), ЛАЗЕРНАЯ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ (SLA-ТЕХНОЛОГИЯ), ОТВЕРЖДЕНИЕ УЛЬТРОФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ (DLP-ТЕХНОЛОГИЯ)

**Объект исследования:** применение аддитивных технологий селективного лазерного сплавления металлических порошков (SLM), отверждение фотополимеров воздействием лазерного и ультрафиолетового излучения (SLA, DLP) в конструкциях аэродинамических моделей.

**Цель работы:** внедрение аддитивных технологий SLM, SLA, DLP в производство аэродинамических моделей и экспериментальных конструкций, разрабатываемых в обеспечение совершенствования характеристик разрабатываемых ЛА различного назначения и улучшающей модернизации эксплуатируемых ЛА.

**Результаты работы:** внедрение аддитивных технологий в 2023 году обеспечило изготовление комплекса изделий в составе аэродинамических моделей, включающих: оснастку для формования деталей из композиционных материалов; агрегатов конструкции моделей (фюзеляжей, консолей крыла, оперений, мотогондол, воздухозаборников и сопел, лопаток компрессоров и лопастей винтов). Освоено изготовление сменных элементов конструкций, таких как: обтекатели; отработываемые сопряжения агрегатов компоновки (крыло-фюзеляж, мотогондолы-пилоны и др.); турбулизаторы и завихрители; детали демонстраторов ТРД; фиксаторы элементов механизации крыла; крепления натуральных ЛА в аэродинамических трубах; элементы приборного оснащения эксперимента. Ряд изделий особо сложной формы не могли быть изготовлены в традиционной механической обработке металлических материалов и ранее не изготавливались в требуемых габаритах и обеспечении качества.

**При внедрении решены принципиальные вопросы технологии:** оценка химического и гранулометрического состава порошковых материалов; оценка точностных и размерных ограничений аддитивного процесса; рациональная конструкция изделий; оптимизация производительности аддитивного процесса (физико-механическое воздействие лазерного излучения; термообработка; технологическая оценка прочности);

постобработка и координатные измерения; неразрушающий контроль; электролитно-плазменная полировка.

Полученные результаты использовались при изготовлении как особо сложных, так и типовых деталей аэродинамических моделей в аддитивных технологиях, внедренных в изготовление моделей, наряду с традиционными технологиями опытного производства ЦАГИ.

**Область применения:** производство аэродинамических моделей, отработка аэродинамических характеристик натурных малоразмерных ЛА, оснащение аэродинамического эксперимента, обеспечивая радикальное снижение сроков изготовления при повышении качества. В 2023 году результаты работы использованы для изготовления более чем 20 аэродинамических моделей ЛА различного назначения, оперативной доработки стенда ресурсных испытаний консоли крыла магистрального пассажирского самолета и акустического стенда, а также доработки 6 малоразмерных ЛА для их улучшающих модификаций в трубных экспериментальных исследованиях. Данные работы выполнены для ряда государственных контрактов (Интеграл-МС, Интеграл-РС, СГС-Стриж, СГС-Сивил и др.), а также прямых договоров с разработчиками авиационной техники России.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФОТОПОЛИМЕРЫ РАЗРАБОТАННЫЕ ПО ЗАДАНИЮ ЦАГИ В. ХАРАКТЕРИСТИКИ. ВНЕДРЕНИЕ В МОДЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЙ SLA И DLP .....	7
1.1. Сформированные требования к фотополимерной композиции для применения в SLA и DLP –технологий.....	7
1.2 Технические характеристики фотополимерных пластиков.....	7
2. ИЗДЕЛИЯ ИЗ ФОТОПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И НЕПОСРЕДСТВЕННО В ИХ КОНСТРУКЦИЯХ....	10
2.1. Изготовление технологической формообразующей оснастки....	10
2.2 Обводообразующие детали аэродинамических моделей.....	11
2.3 Применение аддитивной технологии фотополимеризации в исследованиях новых физических эффектов и изготовлении специальных моделей.....	13
3. ВНЕДРЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В ОТРАСЛЕВОЕ ПРОИЗВОДСТВО АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦАГИ.....	19
3.1 Технологические особенности аддитивного лазерного сплавления (SLM) и характерные детали аэродинамических моделей для изготовления в аддитивной технологии.....	19
3.2 Выбор порошкового конструкционного материала.....	22
3.3 Экспериментальное исследование механических характеристик деталей (прочностных и ресурсных) изготовленных в аддитивной SLM-технологии.....	23
3.4 Конструкции деталей аэродинамических моделей изготавливаемых в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков.....	27
3.5 Обеспечивающие операции изготовления деталей аэродинамических моделей в технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков.....	32
3.6 Повышение уровня модельного производства обеспеченное внедрением аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
СПИСОК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕМЕ	40

## **Введение**

Разработка и изготовление аэродинамических моделей ЛА для трубных испытаний, свободно-штопорящих динамически подобных моделей, а также свободно летающих демонстраторов ДПЛА осуществляется применительно к экспериментальной отработке их аэродинамических компоновок, включая повышение аэродинамического качества, а также характеристик устойчивости и управляемости на всех режимах полета, функциональной эффективности. Важнейшим требованием к модельному производству, наряду с обеспечением качества изделий, становится всемерное снижение времени изготовления и производственных затрат, поскольку при нормированных сроках разработки проектируемых ЛА и улучшающей модернизации эксплуатируемых ЛА, уровень отработки определяется объемом экспериментальных исследований и количеством рассматриваемых технических решений на аэродинамических моделях и демонстраторах.

До последнего времени основным технологическим процессом отраслевого модельного производства функционирующего на базе ЦАГИ, являлась обработка деталей на оборудовании с ЧПУ. Его использование, при изготовлении деталей аэродинамических моделей различной степени сложности и размеров при высокой точности геометрических параметров, характеризуется высокой стоимостью станочного оборудования, инструмента, используемой технологической оснастки, высокой квалификации исполнителей, а также длительными сроками технологического процесса. Высокая геометрическая сложность целого ряда деталей (воздухозаборников, сопел, приемников воздушного давления, и т.д.) предполагает их конструктивно-технологическое членение на ряд более простых деталей и их последующую сборку, что в итоге, определяет при обеспечении необходимой точности, высокую трудоемкость и стоимость изготовления.

Целый ряд деталей малого размера (элементы механизации крыла, фиксаторы поверхностей аэродинамического управления и т.д.) при сравнительной простоте, в характерном единичном характере модельного производства, требуют изготовления индивидуальных заготовок, станочной и последующей финишной слесарной обработки, что обуславливает повышенную трудоемкость и время изготовления. Также особой трудоемкостью отличается изготовление поверхностей сопряжения агрегатов аэродинамической компоновки, определяющих ее аэродинамическое совершенство. Возможности отработки поверхностей сопряжений, зализов и обтекателей в традиционной технологии механической обработки существенно ограничены. Их расширение возможно при непосредственной

корректировке цифровых моделей по результатам расчетов или эксперимента и оперативном изготовлении методами аддитивной технологии.

Необходимым этапом экспериментальных исследований является оценка влияния на характеристики ЛА обледенения агрегатов, моделирование которого до последнего времени было весьма схематическим. Включение в состав экспериментального оборудования ЦАГИ аэрохолодильной установки, обеспечивающей получение наледей близких к естественным, позволяет при современных оптических средствах измерений подготовить исходные данные по их геометрическим параметрам.

Современный уровень оборудования аддитивных технологий обеспечивает изготовление особосложных деталей аэродинамических моделей непосредственно по их цифровым описаниям, подготовленным в САД-системах. Уникальные возможности технологий позволяют изготавливать детали с внутренними полостями, сложной геометрической формы в одном технологическом установе, исключая операции раздельного изготовления деталей и сборки.

Первоначальная информация была получена при ознакомлении с результатами эффективного использования аддитивной технологии лазерной стереолитографии (SLA) в модельном производстве за рубежом (Springer A.M. Application of Rapid Prototyping Methods to High-Speed Wing Tunnel Testing MSFS Center Director's Discretionary Fund Report, Project № 96-21. May 1998). Данная информация стимулировала последующие исследования аддитивных технологий применительно к их использованию в модельном производстве ЦАГИ.

По результатам оценки характеристик технологий и реализующего их оборудования было принято решение о внедрении в производство аэродинамических моделей и экспериментальных конструкций аддитивных технологий SLA, DLP, SLM.

Внедрение аддитивных технологий в 2023 году стало ключевым для изготовления более чем 150-ти деталей особо сложной геометрической формы в конструкциях аэродинамических моделей ЛА, изготавливаемых по государственным контрактам (Интеграл-МС, Интеграл-РС, СГС-Стриж, СГС-Сивил и др.), а также прямым договорам с разработчиками авиационной техники различного назначения России, обеспечив их изготовление в заданные сроки. Наряду с деталями в составе аэродинамических моделей, изготавливалась: оснастка для формования обшивок из композиционных материалов, изготавливались демонстраторы сопел и воздухозаборников для отработки на стендах ФАУ «ЦАГИ» и «ЦИАМ», лопатки компрессоров для демонстраторов ТРД; элементы приборного оснащения аэродинамического

эксперимента; креплений натуральных малоразмерных ЛА в аэродинамических трубах для экспериментальной отработки.

При внедрении решены принципиальные вопросы технологии: оценка химического и гранулометрического состава порошковых материалов; точностных и размерных характеристик деталей изготавливаемых в аддитивных технологиях; рациональная конструкция изделий; оптимизация производительности аддитивного процесса (физико-механическое воздействие лазерного излучения; термообработка; технологическая оценка прочности); постобработка и координатные измерения для обеспечения точности детали в пост-обработке; неразрушающий контроль; электролитно-плазменная полировка.

В технологии SLM используются в качестве конструкционных материалов металлические порошки, сплавляемые послойно лучом лазера, что определяет высокие механические характеристики сопоставимые с традиционными металлическими материалами, подлежащими механической обработке. Для них существенной становится многоэтапная постобработка, обеспечивающая получение требуемых точностных и механических характеристик. В технологиях SLA и DLP используются фотополимеры отверждаемые послойно лазерным или световым ультрафиолетовым излучением. Их изготовление существенно менее трудоемко, финишная доводка просто обеспечивается ручной обработкой. Механические характеристики фотополимеров существенно не высоки, сопоставимы с характеристиками древесины. Они эффективно используются в массивных деталях, а также тонкостенных деталях, накладываемых на металлические или с включаемыми в конструкцию металлическими усиливающими элементами.

Практические результаты внедрения аддитивных технологий в производство аэродинамических моделей ФАУ «ЦАГИ» рассматриваются в настоящем отчете.

## **1. Фотополимеры разработанные по заданию ЦАГИ в. Характеристики. Внедрение в модельное производство технологий SLA и DLP**

### **1.1. Сформированные требования к фотополимерной композиции для применения в SLA и DLP –технологий.**

Разработка выполнялась ИПЛИТ РАН, актуальное название («ИПЛИТ – Шатура»), НИЦ «Курчатовский институт»):

1. Обеспечиваемая точность не хуже 0,1 мм;
2. Механические характеристики, допускающие высокие нагрузки; поверхностного давления;
3. Оптическая прозрачность;
4. Полируемость;
5. Водостойкость для специальных моделей с системой выпускаемых индикаторных красителей, используемых при физических исследованиях обтекания в гидротрубах.
6. Термостойкость: сохранение прочностных характеристик до (50-60)°С и температуры стеклования не менее 100°С;
7. Оперативность изготовления и простота ручной механической обработки.

### **1.2 Технические характеристики фотополимерных пластиков**

В модельном производстве достаточно широко используются модельные пластики, типа АБС. Они применяются при изготовлении технологической оснастки фрезерованием на станках с ЧПУ для формования композитов, а также для наклейки на металлические сердечники и оперативного изготовления обводообразующих поверхностей агрегатов модели фрезерованием. Заменой АБС пластика в аддитивной технологии становятся фотополимеры.

Фотополимерные композиции предлагались зарубежными изготовителями (США, Германия, Швейцария). По заданию ЦАГИ в «ИПЛИТ – Шатура», НИЦ «Курчатовский институт» были изготовлены отечественные фотополимерные композиции, всестороннее исследование которых было проведено в ЦАГИ.

На рисунках 1,2 показаны элементарные образцы для исследования механических характеристик и термостойкости. Поскольку механические характеристики фотополимеров существенно ниже металлических материалов, потребовалось применение специальных испытательных машин с малыми нагрузками на образцы.



Рисунок 1. Элементарные образцы



Рисунок 2. Прочностные характеристики: растяжение, изгиб, сжатие

Сравнение технических характеристик зарубежных фотополимерных пластиков и фотополимерных пластиков разработки ИПЛИТ, а также модельного АБС пластика дано в таблице 1. Видно, что механические характеристики отечественного полимера ИПЛИТ 3 несколько превосходят характеристики известного зарубежного ProtoTherm 12120. Температура стеклования у них приблизительно одинаковы. Поскольку глубина проникновения излучения у ИПЛИТ 3 в 1,5 раза больше, производительность изготовления деталей также более высокая. Существенно ниже стоимость отечественного полимера.

Таблица 1 - Сравнение технических характеристик отвержденных фотополимерных пластиков и модельного АБС пластика

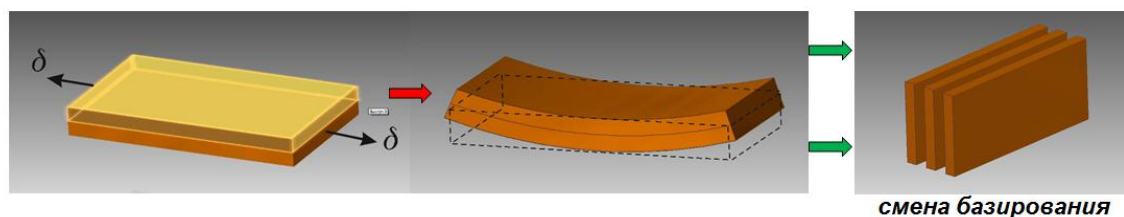
Фотополимер	DSM 11112	ProtoTherm 12120	ИПЛИТ 1	ИПЛИТ 2	ИПЛИТ 3	АБС пластик
Предел прочности, МПа	48.3	70.2	25	55	89	45.7
Модуль упругости, МПа	2.14	3,3			3	2.3
Твердость по Шору	н/д	85.3			140	-
Температура стеклования, ° С	41	110*			110	-
Ударная прочность, Дж/м	19.3	12				160
Ударная вязкость, кДж/см <sup>2</sup>					2.6	-
Пороговое значение энергии отверждения, мДж/см <sup>2</sup>	11.5	11.8			1.2	-
Глубина проникновения излучения, мм	0.14	0.154			0.19	-

## 2 Изделия из фотополимеров для применения при изготовлении деталей аэродинамических моделей и непосредственно в их конструкциях

Внедренные аддитивные технологии послойного отверждения фотополимеров лазерным и ультрафиолетовым излучением применяются при изготовлении формообразующей технологической оснастки для формования деталей из композиционных материалов, изготовлении элементов аэродинамических моделей, обеспечивающих оперативную модификацию поверхностей агрегатов при экспериментальной отработке обводообразующей поверхности аэродинамической компоновки, оперативном изготовлении деталей и агрегатов, включая модели специального назначения для ускоренной проверки эффективности новых технических решений с минимальными затратами труда и времени.

### 2.1. Изготовление технологической формообразующей оснастки

Для процесса аддитивного изготовления изделий из фотополимеров, выполняемого послойным отверждением характерно коробление, связанное с усадкой последовательно отверждаемых слоев (показано на рисунке 3).



- а) Базирование детали по площади основания  
б) Смена базирования – по торцу детали

Рисунок 3. Коробление изделий из фотополимера

Коробление снижается при размещении детали с базированием по торцу. Однако число слоев и время изготовления увеличивается.

В составе изделий из фотополимера существенный объем занимает формообразующая оснастка для формования деталей из композиционных материалов. Рассмотренные варианты конструкции оснастки применительно к снижению коробления показаны на рисунке 4 (а,б,в,г,д). Подобные конструктивные решения обеспечивают сохранение геометрической формы и отвечают требованиям «холодного» (до 90°C) формования.

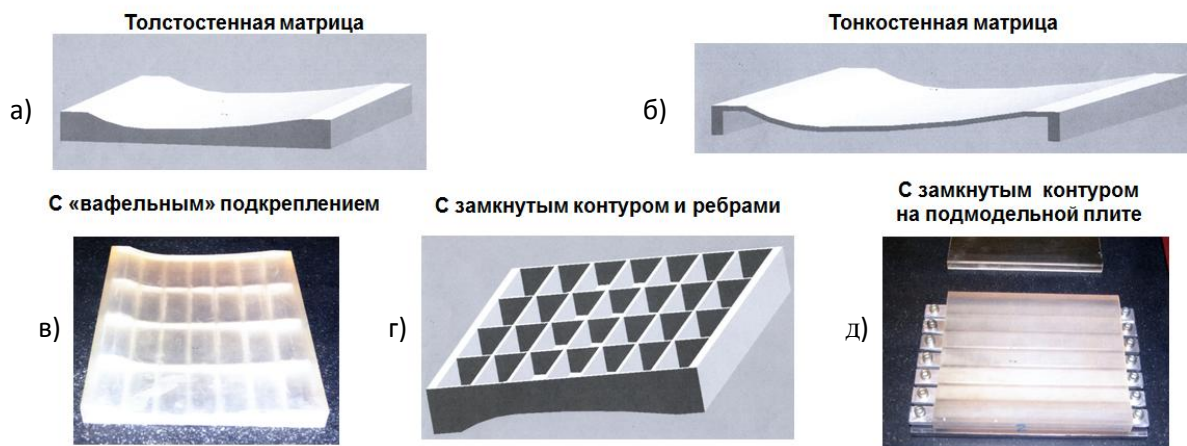
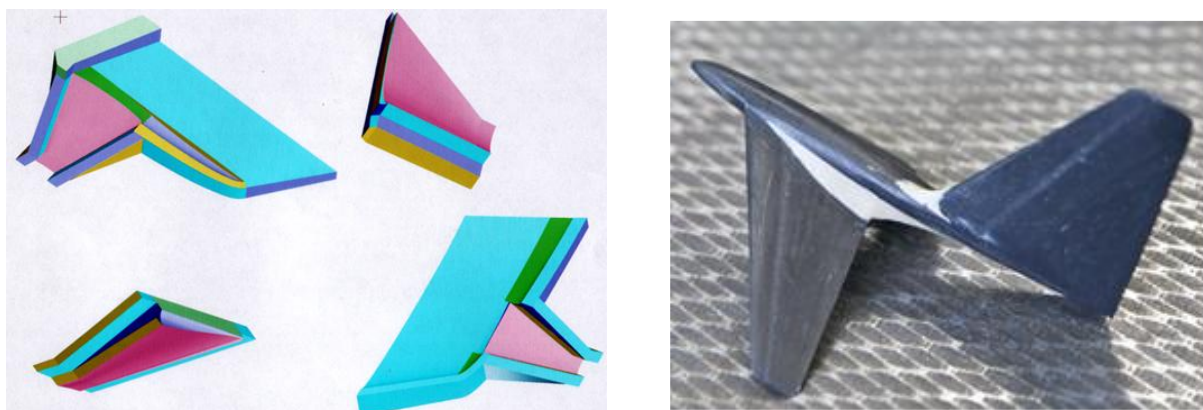


Рисунок 4. Варианты конструкции формообразующей оснастки

На рисунке 5а показана одна из составных пресс-форм, обеспечивающих изготовление законцовок крыла магистральных пассажирских и транспортных самолетов, систематическое исследование которых выполнялось в ЦАГИ для разработки рекомендаций конструкторам самолетов. Отформованная деталь, один из вариантов законцовок крыла («Wing let») показана на рисунке 5б. На фотографии детали видна выполненная в процессе трубных исследований улучшающая доработка поверхности (белый цвет).



а) Конструкция пресс-формы

б) Отформованная законцовка крыла (белый цвет – отработка поверхности в эксперименте)

Рисунок 5. Формообразующая оснастка, изготавливаемая в аддитивной технологии фотополимеризации

## 2.2 Обводообразующие детали аэродинамических моделей

Аддитивная технология изготовления деталей из фотополимеров эффективно применяется при изготовлении обтекателей и обводообразующих

накладок, присоединяемых к металлическим деталям аэродинамических моделей. Другим решением становится усиление деталей из фотополимера металлическими сердечниками и шинами. На рисунке 6 показаны изготовленные из фотополимера обтекатели для кронштейнов крепления механизации крыла, передней кромки (предкрылки, рисунок 6а), задней кромки (закрылки, рисунок 6б).

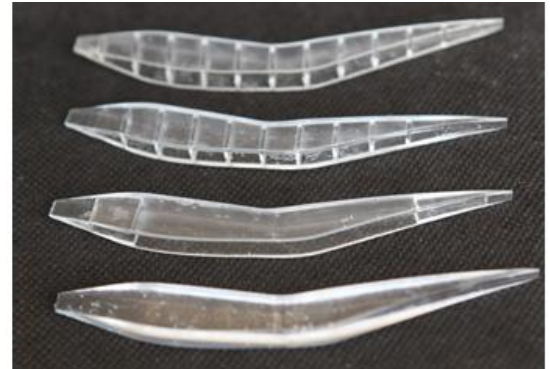
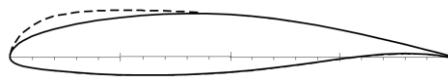


Рисунок 6. Обтекатели кронштейнов крепления механизации крыла

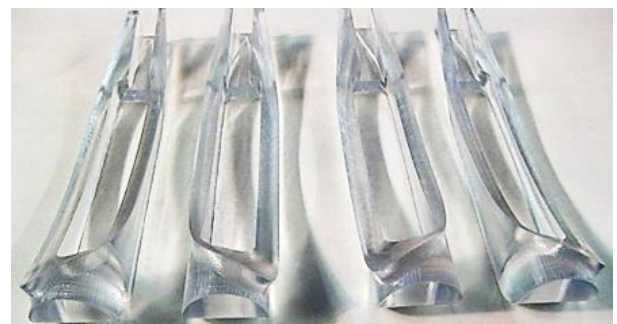
Накладки устанавливаемые на кромки крыла, включая имитаторы обледенения, сопряжения («зализы») агрегатов (мотогондолы-пилон-крыло), показаны на рисунке 7 а,б,в).



б) Имитаторы обледенения на кромках крыла



а) Накладки, модификация для снижения волнового сопротивления



в) Варианты сопряжений («зализы») агрегата мотогондола-пилон-крыло

Рисунок 7. Зонные накладки на конструкцию модели

Одной из важнейших локальных поверхностей аэродинамической компоновки самолета, влияющей на ее аэродинамическое совершенство является сопряжение крыла и фюзеляжа, отрабатываемое в аэродинамическом эксперименте. Тематическая модель отечественного магистрального пассажирского самолета, для проведения такой отработки показана на рисунке 8. У нее крыло и фюзеляж металлические, изготовленные фрезерованием на обрабатывающем центре с ЧПУ. Варианты поверхности сопряжения крыло-фюзеляж изготавливались из фотополимера в аддитивной SLA-технологии. Они, при проведении эксперимента, устанавливаются на модели. Изменение поверхности сопряжения обеспечивается простой заменой на новые детали.

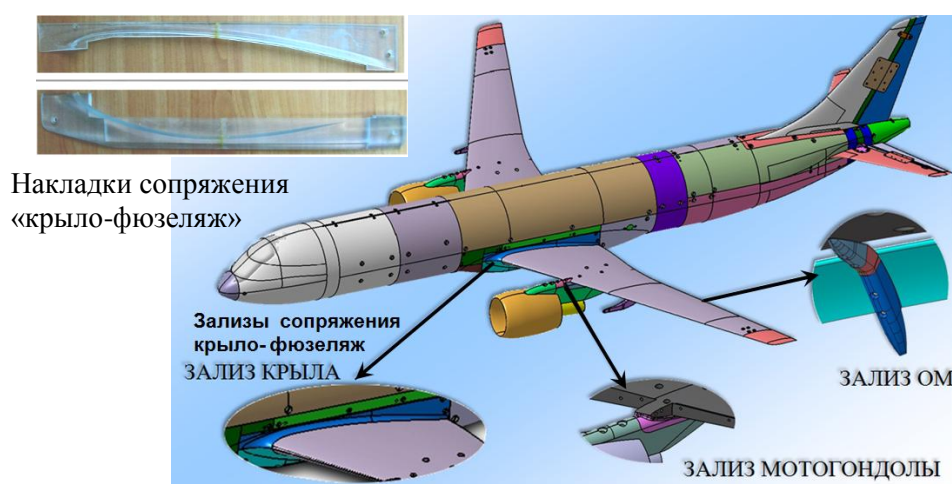


Рисунок 8. Экспериментальная отработка поверхностей сопряжения («зализов») агрегатов аэродинамической компоновки магистрального самолета, изготавливаемых в аддитивной технологии лазерной фотополимеризации (SLA)

### **2.3 Применение аддитивной технологии фотополимеризации в исследованиях новых физических эффектов и изготовлении специальных моделей**

Повышенной эффективностью характеризуется аддитивная технология фотополимеризации лазерным и ультрафиолетовым излучением в оперативных исследованиях новых физических эффектов и технических решений, позволяя в предельно сжатые сроки при минимальных затратах получить результаты и оценить целесообразность продолжения и организации углубленных исследований.

Характерным примером является исследование рациональной профилировки вентиляторных и компрессорных лопаток, определившей подготовку рекомендаций ЦАГИ по модернизации системы охлаждения

силовой установки вертолета и разработки малошумного вентилятора для пилотируемых космических аппаратов. Соответствующие модельные изделия приведены на рисунке 9. Вентиляторные лопатки из фотополимера с внутренними карманами под размещение усиливающих металлических шин. Используются удлиненные оси для крепления лопаток к ротору, обеспечивающее устойчивость к центробежным силам.

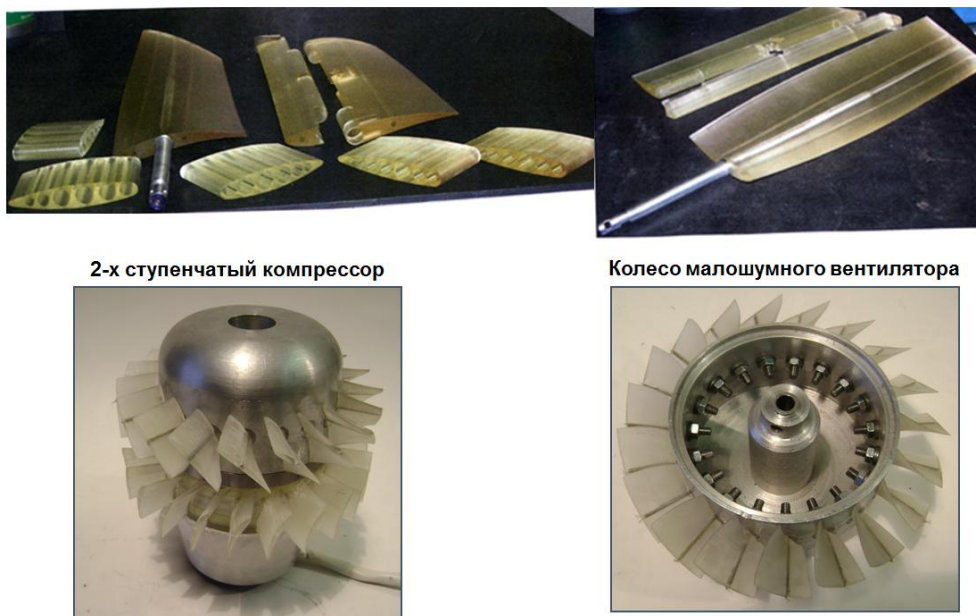


Рисунок 9. Модели для оперативной отработки лопаток и лопаточных колес

Изготовленные с целью проверки нового технического решения, анонсированного за рубежом, по снижению шума пассажирского самолета на режимах взлета и посадки модели шевронных закрылков, показаны на рисунке 10.

Оперативное изготовление позволило акустикам ЦАГИ получить экспериментальную оценку эффективности решения в течение месяца, до завершения экспериментальных исследований за рубежом.

В числе наиболее эффективных средств повышения подъемной силы аэродинамических поверхностей рассматривается выдув струй в пограничный слой крыльевых поверхностей. Основные классические результаты были получены на моделях в виде круговых цилиндров с продольными щелями для выдува воздушной струи. Стилизация формы модели обуславливалась простотой изготовления. Применительно к экспериментальному исследованию возможности сокращения дистанции взлета маневренного самолета за счет установки в носовой части крылевой поверхности с особо

высокой подъемной силой была разработана и изготовлена в аддитивной SLA-технологии аэродинамическая модель, рисунок 11.

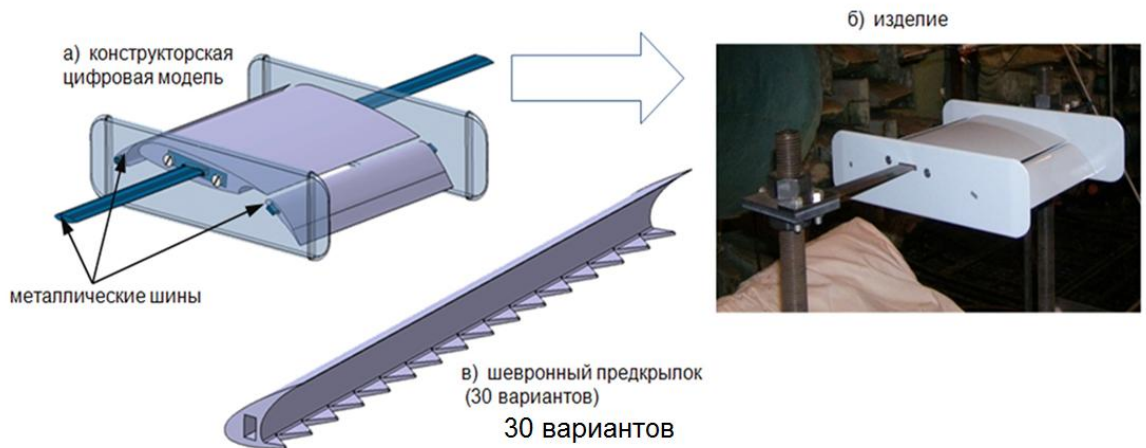


Рисунок 10. Экспериментальная модель для исследования эффективности снижения шума пассажирского самолета на взлете и посадке при использовании шевронных предкрылков. Изготовлены 30 вариантов предкрылков.

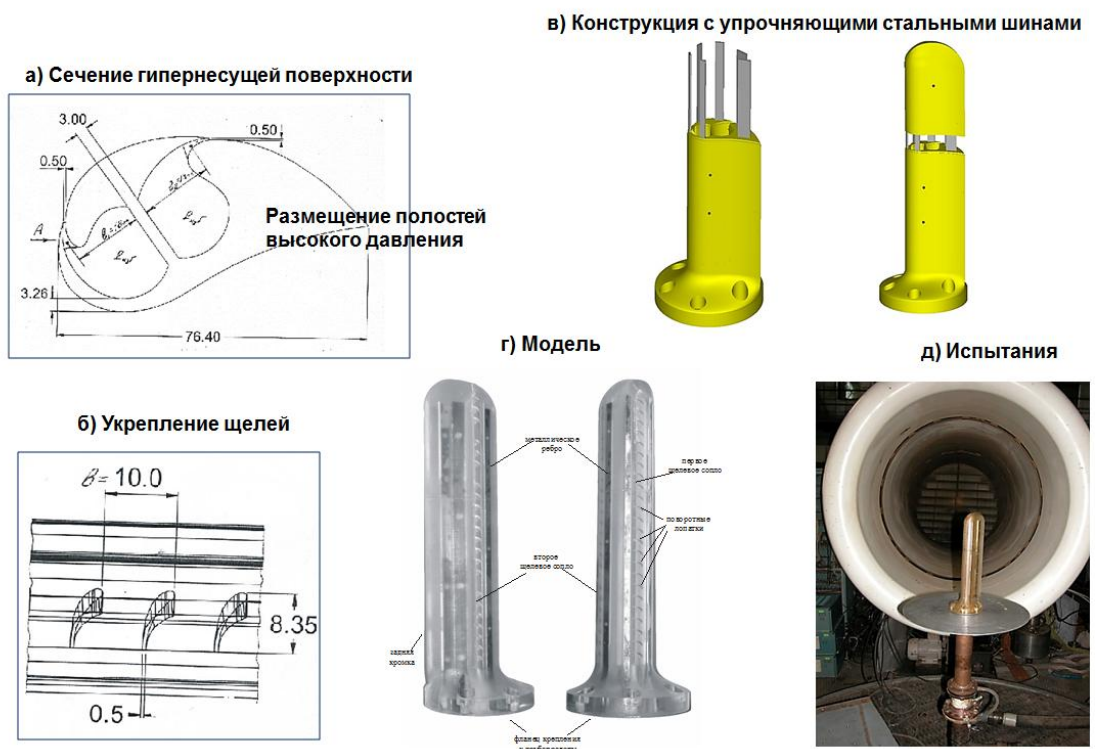


Рисунок 11. Модель для исследования эффективности выдува в пограничный слой

В заданную внешнюю профилировку высоконесущей («гипернесущая» на рисунке) поверхности вписываются полости высокого давления, соединенные с щелями на внешней поверхности модели (рисунок 11а). Поскольку протяженность щелей при заданном давлении в полостях не обеспечивается прочностью фотополимера, они соединяются профилированными перегородками (рисунок 11б). Стенки поверхности упрочняются установкой стальных шин, рисунок 11в. Фотографии изготовленной модели высоконесущей поверхности, показаны на рисунке 11г, а ее установка в аэродинамической трубе – на рисунке 11д.

Использование аддитивной SLA-технологии позволило изготовить модель высоконесущей поверхности в виде одной детали в предельно сжатые сроки. Разработанная конструкция обеспечила необходимую прочность и условия успешного проведения экспериментальных исследований.

В парк экспериментальных установок ЦАГИ входит гидротруба ГТ-400 для проведения физических экспериментов с визуализацией обтекания дренированных моделей путем выпуска индикаторных красителей через дренажные отверстия (рисунок 12).

**Гидротруба (ГТ – 400)**



**Обтекание модели потоком воды**



**Рисунок 12. Исследование обтекания модели в гидротрубе с выпуском индикаторных красителей**

Изготовление моделей с индикаторными красителями фактически завершилось в середине 1990-х годов. Для ее восстановления эффективным оказалось использование аддитивной технологии лазерной стереолитографии

(SLA). Такие модели были изготовлены для исследования физики обтекания в обеспечение разработки перспективных аэродинамических компоновок Российских пассажирских и транспортных самолетов. Конструктивные и технологические решения дренированных моделей с индикаторными красителями, обеспечившими внедрение технологии изготовления моделей данных типов иллюстрируются на рисунке 13.

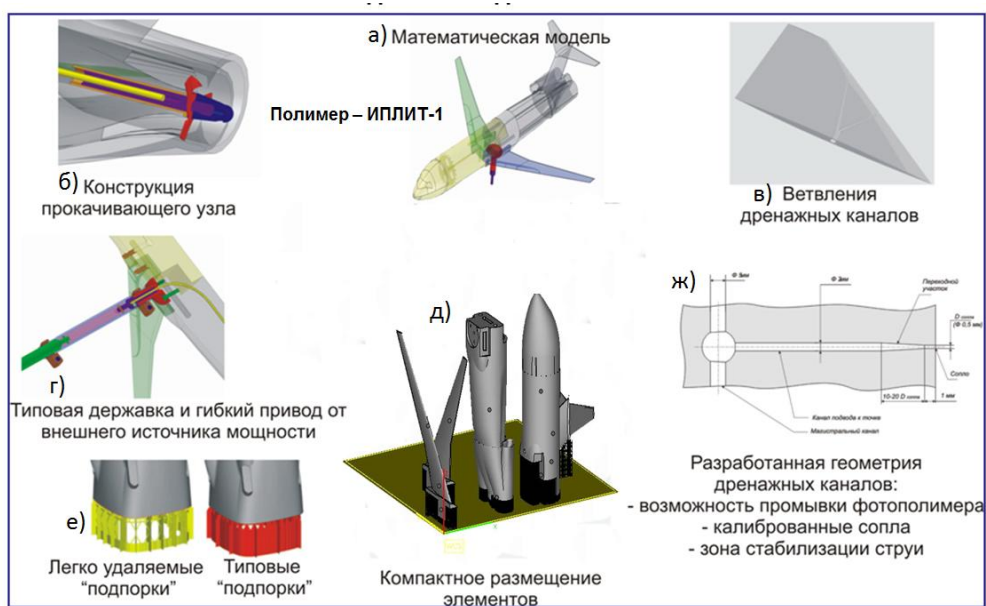


Рисунок 13. Конструкционно-технологические решения дренированных моделей с индикаторными красителями для исследований в гидротрубе.

Исходные данные для разработки конструкции составляют внешняя обводообразующая поверхность моделируемого самолета в модельном масштабе с обозначенными позициями дренажных отверстий. В соответствии с ними выполняется разработка конструкции модели, представляемой цифровым макетом (математической моделью), показано на рисунке 13а. Необходимым компонентом модели при моделировании мотогондол становится прокачивающий узел (рисунок 13б), обеспечивающий течение жидкости по внутренним каналам. В обводах модели реализуется система ветвящихся каналов для подачи красителей к дренажным отверстиям (рисунок 13в). Привод прокачивающего узла осуществляется от внешнего источника мощности через гибкий вал (рисунок 13г). Детали модели компактно размещаются на подмодельной плите (рисунок 13д). Их размещение и ориентация должны обеспечивать максимальное заполнение рабочего пространства при согласовании высоты деталей, определяющей число слоев отверждаемого фотополимера. Время изготовления деталей практически мало

зависит от заполнения рабочей зоны. Оно прежде всего определяется механическим движением при опускании рабочей платформы и разравнивания полимера рекоутером.

Поскольку детали модели характеризуются малой толщиной для них разработаны легко удаляемые, по сравнению с типовыми, подпорки (рисунок 13е). Разработанная для модели геометрия дренажных каналов обеспечивает возможность промывки не отвержденного полимера из каналов, а также стабилизацию струй красителя с минимизацией завихрений и размывания (рисунок 13ж).

Визуализация обтекания относительно одной из компоновок пассажирского самолета показана на рисунке 14.

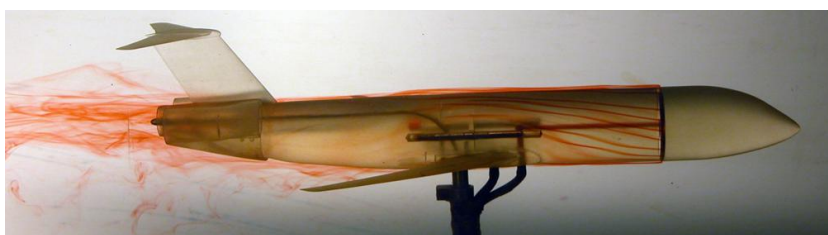


Рисунок 14. Визуализация течения относительно компоновки пассажирского самолета в гидротрубе

### **3. Внедрение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков в отраслевое производство аэродинамических моделей ЦАГИ**

Аддитивная технология селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошковых материалов характеризуется уникальными возможностями по изготовлению деталей особо сложной геометрической формы при высоких механических характеристиках близких к изделиям порошковой металлургии. Ее внедрение тем не менее определяется требованиями модельного производства, габаритами рабочей зоны аддитивных установок, особенностями технологического процесса.

#### **3.1 Технологические особенности аддитивного лазерного сплавления (SLM) и характерные детали аэродинамических моделей для изготовления в аддитивной технологии**

Особенности технологического процесса, подлежащие учету при внедрении технологии:

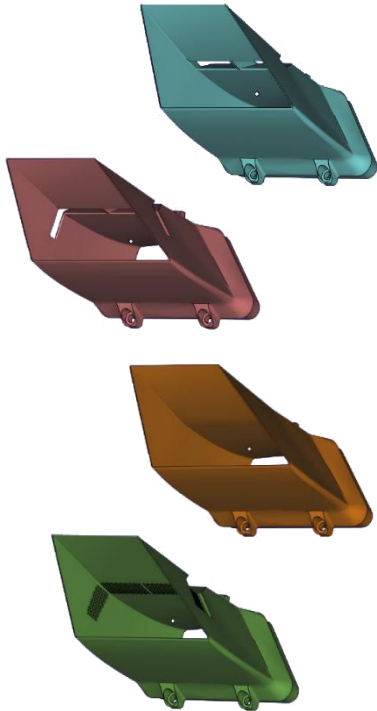
- габариты изделий, влияющие на возможность их размещения в объеме рабочей зоны установки составляют 250x250x320мм;
- размещение деталей на строительной платформе и ориентация их относительно плоскости платформы, оказывают влияние на производительность изготовления и качество поверхности;
- положение деталей или ее элементов по отношению к направлению движения ножа или валика, наносящего порошковый материал;
- технологические возможности оборудования и особенности технологического процесса сплавления, влияют на качество изготовления элементов конструкции деталей (например, отверстий и тонких стенок);
- возникновение внутренних напряжений при лазерном сплавлении и их влияния на возможное коробление или отрыв деталей от строительной платформы;
- сложность и объем поддерживающих конструкций, которые должны обеспечивать надежное крепление детали к поверхности платформы в процессе изготовления и пост-обработки;
- время и трудоемкость отделения изделия от строительной платформы, удаления поддерживающих конструкций;
- необходимость применения дополнительных технологических процессов пост-обработки: стабилизирующая термообработка, горячее изостатическое прессование, пескоструйная обработка, механическая обработка с применением оборудования с ЧПУ, слесарная обработка и полировка.

Наиболее востребована новая технология при изготовлении деталей моделей, включающих: воздухозаборники, сопла, элементы мотогондол и специального оборудования аэродинамического эксперимента. Описание конструктивных элементов дано в таблице 2.

Таблица 2 Детали аэродинамических моделей для изготовления в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков

Наименование	Вид деталей	Особенности конструкции
Малая сопловая модель.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие протяженных тонкостенных элементов конструкции.</li> <li>2. Минимальная толщина кромок – 0,3мм</li> <li>3. Характерный габаритный размер – 201мм.</li> <li>4. Наличие внутренних полостей, каналов и протоков сложной формы.</li> <li>5. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>6. Наличие модификаций конструкций.</li> <li>7. Невозможно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>
Большая сопловая модель.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Имеет 3 выражения габаритных размеров.</li> <li>2. Характерный габаритный размер – 250мм.</li> <li>3. Минимальная толщина кромок – 0,35мм.</li> <li>4. Наличие внутренних полостей, каналов и протоков сложной формы.</li> <li>5. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>6. Невозможно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>
Проток для большой сопловой модели.		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Имеет 2 выраженных габаритных размера.</li> <li>2. Характерный габаритный размер – 238мм.</li> <li>3. Минимальная толщина кромок – 0,35мм</li> <li>4. Наличие внутренних каналов и протоков сложной формы.</li> <li>5. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>6. Наличие модификаций конструкций.</li> <li>7. Затруднительно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>

Продолжение таблицы 2

<p>Малые воздухозаборные устройства (ВЗУ).</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие протяженных тонкостенных элементов конструкции.</li> <li>2. Минимальная толщина кромок – 0,5мм</li> <li>3. Характерный габаритный размер – 168мм.</li> <li>4. Наличие внутренних полостей.</li> <li>5. Наличие перфорации на стенках, диаметр отверстий 0,5мм.</li> <li>6. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>7. Наличие модификаций конструкций.</li> <li>8. Вариантность правого и левого исполнения.</li> <li>9. Затруднительно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>
<p>Корпус для сменных ВЗУ.</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Имеет выраженный габарит по одной из сторон конструкции.</li> <li>2. Характерный габаритный размер – 195мм.</li> <li>3. Наличие внутренних полостей сложной формы.</li> <li>4. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>5. Затруднительно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>
<p>Средние ВЗУ с элементами фюзеляжа (обечайки ВЗУ).</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Реализация сложной интегральной сборки деталей в одной конструкции.</li> <li>2. Имеет выраженные габариты по двум сторонам конструкции.</li> <li>3. Характерный габаритный размер – 217мм.</li> <li>4. Наличие протяженных тонкостенных элементов конструкции.</li> <li>5. Минимальная толщина кромок – 0,5мм.</li> <li>6. Наличие внутренних полостей.</li> <li>7. Наличие перфорации на стенках, диаметр отверстий 0,5мм.</li> <li>8. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>9. Наличие модификаций конструкций.</li> <li>10. Вариантность правого и левого исполнения.</li> <li>11. Невозможно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>

## Продолжение таблицы 2

<p>Мотогондола двигателя со сменными створками.</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Реализация сборной конструкции с разными вариантами элементов.</li> <li>2. Характерный габаритный размер – 135мм.</li> <li>3. Минимальная толщина стенок – 2мм.</li> <li>4. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>5. Наличие множества модификаций конструкций.</li> <li>6. Высокая трудоемкость изготовления в традиционной технологии из-за множества модификаций.</li> </ol>
<p>Законцовка мотогондолы.</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Наличие протяженных тонкостенных элементов конструкции.</li> <li>2. Минимальная толщина кромок – 0,5мм</li> <li>3. Характерный габаритный размер – 129мм.</li> <li>4. Наличие особо точных стыковочных элементов.</li> <li>5. Наличие модификаций конструкций.</li> <li>6. Затруднительно изготовить в традиционной технологии.</li> </ol>

### 3.2 Выбор порошкового конструкционного материала

Приведенные в таблице 2 детали, моделирующие элементы силовых установок, как правило в традиционном модельном производстве изготавливаются из высокопрочной конструкционной стали типа 30ХГСА. Ее рациональной заменой стала порошковая нержавеющая сталь типа РН1 (Германия). Сравнение сталей дано в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические характеристики сплавов РН1 и 30ХГСА

Марка	Предел прочности $\sigma_B$	Предел текучести условный, $\sigma_{0.2}$	Предельная деформация, $\varepsilon$	Модуль упругости, $E$	Твердость по Роквеллу HRC	Ударная вязкость KCU T=+20C
	кгс/мм <sup>2</sup>	кгс/мм <sup>2</sup>	%	кгс/мм <sup>2</sup>	-	Дж/см <sup>2</sup>
Нержавеющая сталь РН1	128	89	7,6	18960	36	125
Сталь 30ХГСА (после закалки и отпуска, [5])	110	96	7,4	20000	36	75

Характеристики импортной и разработанных отечественными изготовителями порошковых сталей приведены в таблице на рисунке 15.

С учетом сопоставления характеристик принято решение о внедрении в изготовление деталей аэродинамических моделей порошковых нержавеющей сталей отечественного производства.

### 3.3 Экспериментальное исследование механических характеристик деталей (прочностных и ресурсных) изготовленных в аддитивной SLM-технологии

С целью экспериментальной оценки характеристик отечественных порошковых материалов выполнен комплекс экспериментальных исследований, включающий оценку гранулометрических характеристик порошка (рисунок 15), разработку элементарных тематических образцов, конструктивно подобных образцов и шлифов для электронной микроскопии структуры материала после сплавления. Изготавливаемые образцы приведены на рисунке 16.

При проведении экспериментальных исследований выполнялись испытания образцов на статическую прочность, ресурсные испытания, испытания на ударную прочность. Проводилось расчетное сопровождение испытаний в котором оценивалась концентрация напряжений в образцах с переменными сечениями и различными параметрами галтельных переходов. Виды испытаний, а также конструкция образцов приведены на рисунке 17. Также на рисунке для принятой в конструкции деталей изготавливаемых в SLM-технологии нержавеющей стали и традиционной для модельного производства конструкционной стали 30ХГСА построена сравнительная диаграмма растяжения в осях  $\varepsilon - \sigma$ . Видно, что используемая в технологии SLM нержавеющая сталь не уступает традиционной конструкционной.

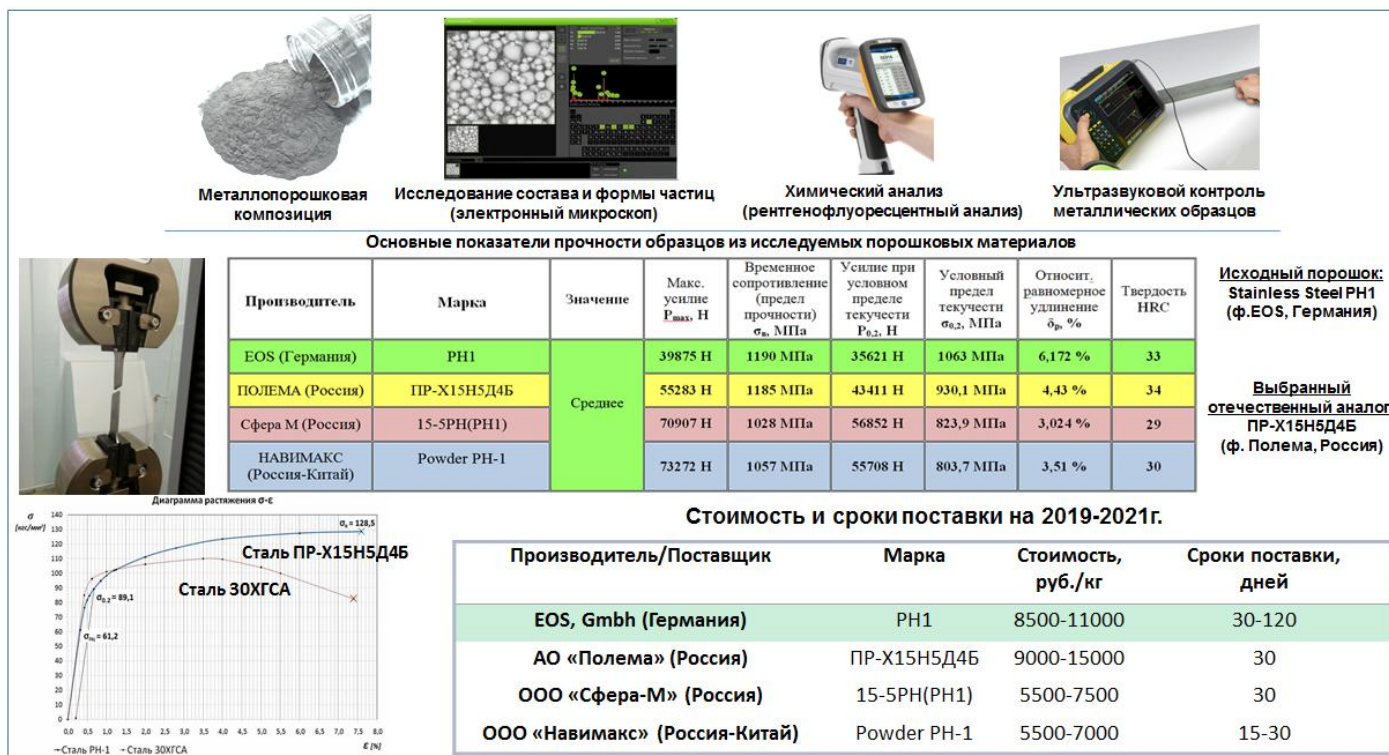


Рисунок 15. Отечественные порошковые материалы для SLS-технологии в модельном производстве

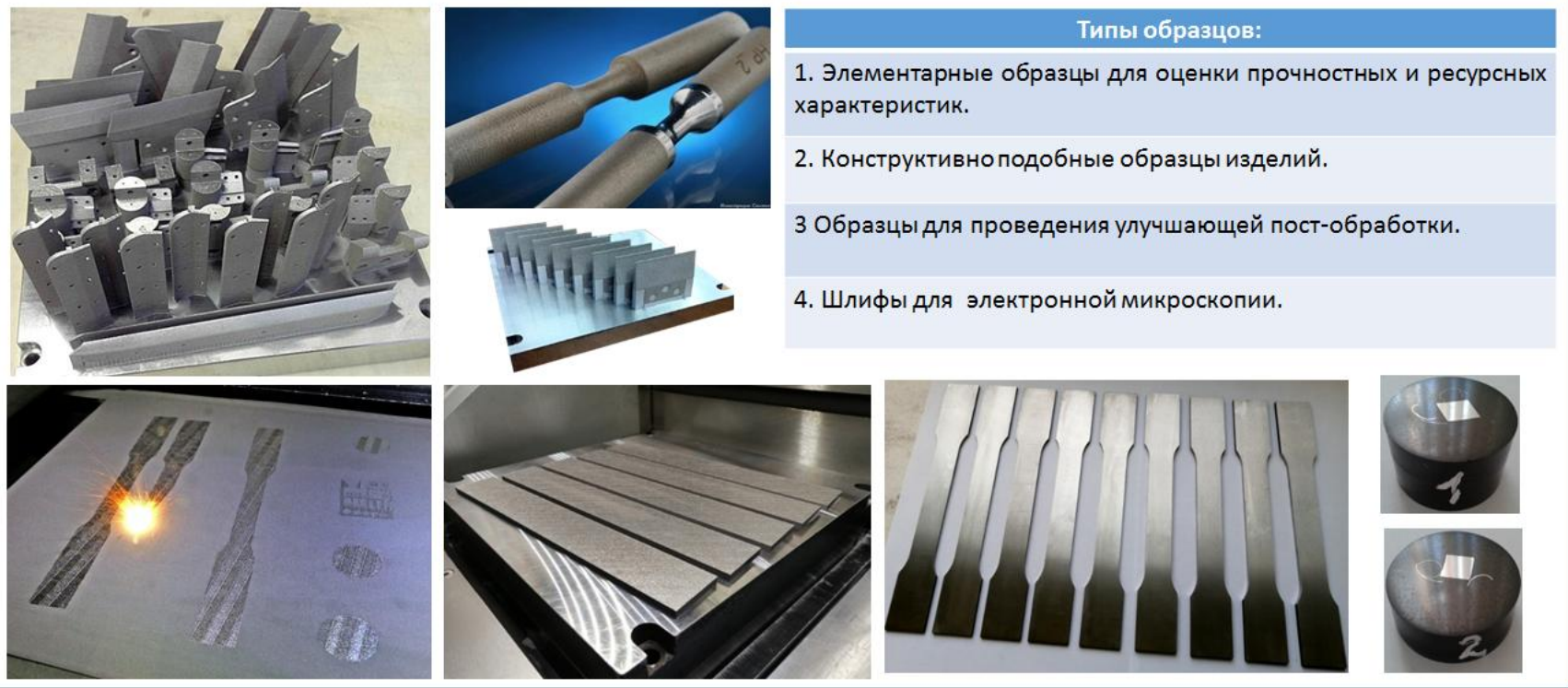


Рисунок 16. Изготавливаемые образцы из металлических порошковых материалов в SLM-технологии для прочностных и ресурсных испытаний

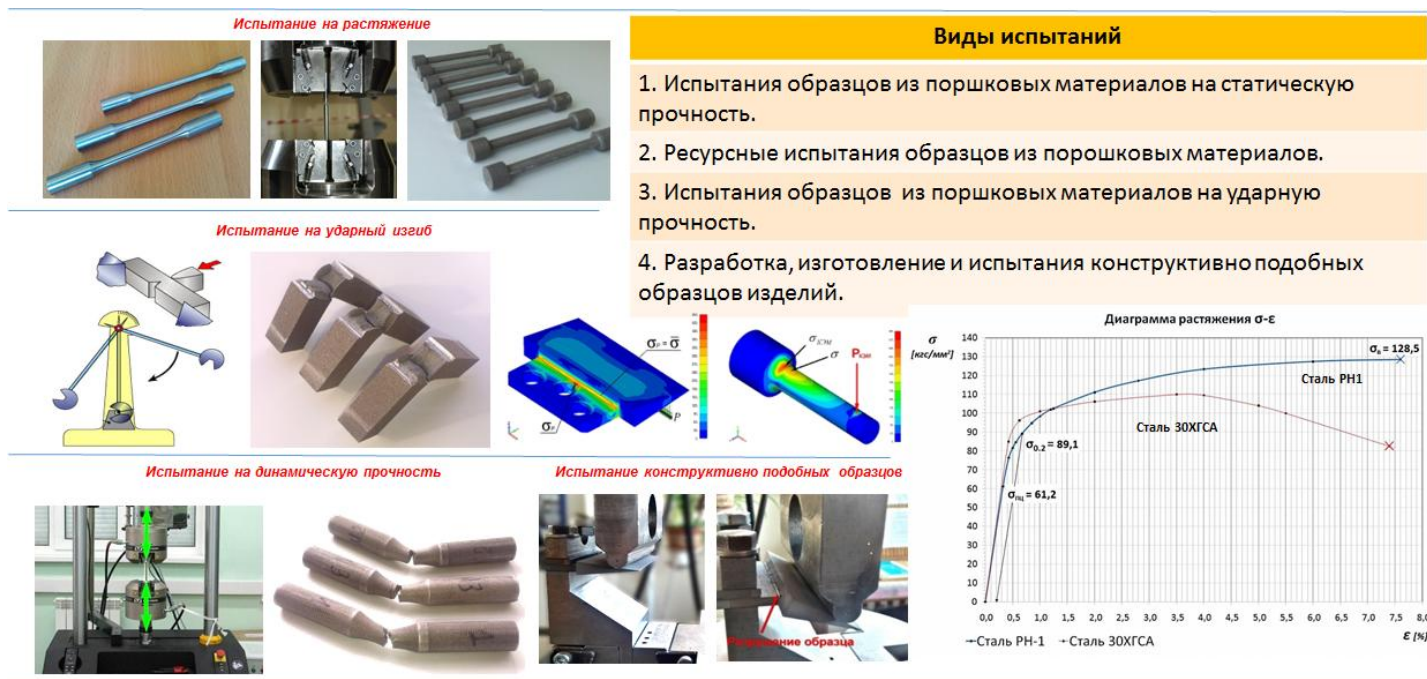
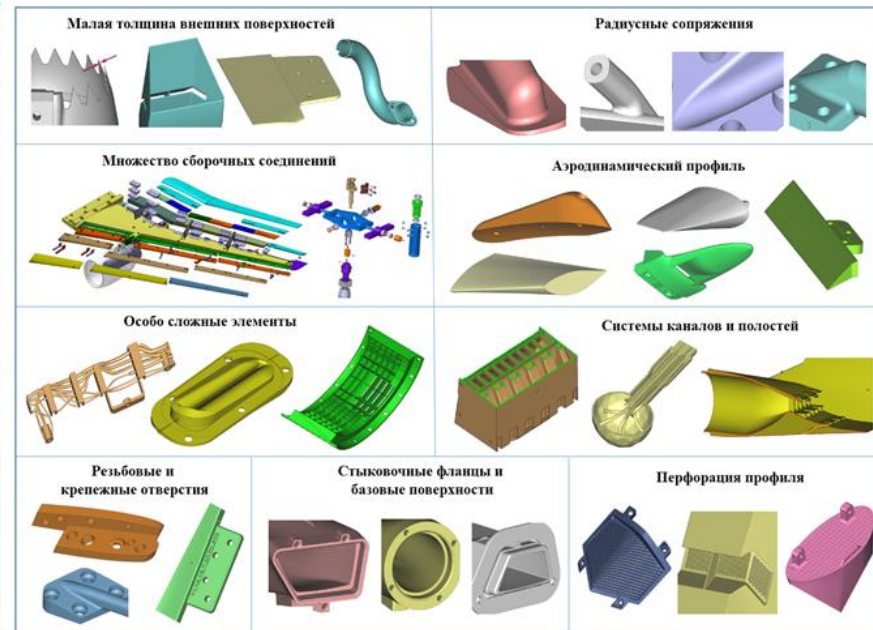


Рисунок 17. Проводимые испытания элементарных и конструктивно - подобных образцов

### **3.4 Конструкции деталей аэродинамических моделей изготавливаемых в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков**

Из рассмотрения конструкций аэродинамических моделей самолетов различного назначения были определены элементы конструкции, изготовление которых наиболее рационально в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков. В частности, на рисунке 18 показано семейство аэродинамических моделей, изготавливаемых в обеспечение экспериментальной отработки аэродинамической компоновки самолета МС-21. При изготовлении данных моделей началось расширяющееся внедрение аддитивной SLM технологии. Характерные детали конструкции моделей также показаны на рисунке 18. В их числе как особо сложные, так и сравнительно простые детали, в частности элементы механизации крыла и кронштейны-фиксаторы для их установки под требуемыми углами при проведении испытаний. Общими конструктивными элементами в деталях являются малые толщины кромок для внешних поверхностей, наличие радиусных (галтельных) сопряжений, фланцевых соединений с резьбовыми крепежными отверстиями, аэродинамическая профилировка, причем для ряда деталей с перфорационными отверстиями, наличие внутренних каналов.

Необходимым для обоснования внедрения аддитивной технологии стала оценка технической и экономической целесообразности изготовления сравнительно простых деталей, замещая традиционную механическую обработку на станках с ЧПУ. На рисунке 19 показана типовая конструкция консоли крыла аэродинамической модели с компонентами механизации (предкрылки, закрылки, дефлектора, интерцепторы, элероны) и кронштейны для их фиксации под требуемыми углами установки. В целом число соответствующих уникальных деталей составляет до 300 и более. В таблице на рисунке 19 дано сравнение производительности технологий: аддитивного изготовления заготовок, напылением металлического порошка DMD/DED; селективного лазерного сплавления SLM; и фрезерования на современном станке с ЧПУ. Также приведена схема возможного размещения деталей консоли крыла в зоне обработки установки аддитивного сплавления. Видно, что ряд деталей с увеличенными габаритами, например, центральная часть консоли, должны изготавливаться на станке. Принципиальные преимущества аддитивной технологии: возможность группового изготовления деталей в одном установе, отсутствие необходимости раскроя штатного сортамента поставки металлических материалов и изготовление заготовки.



Варианты типовых конструкций моделей магистрального самолета МС-21 для проведения испытаний в аэродинамических трубах.

Конструктивные элементы деталей аэродинамических моделей ЛА

Рисунок 18 - Характерные конструктивные элементы деталей аэродинамических моделей ЛА

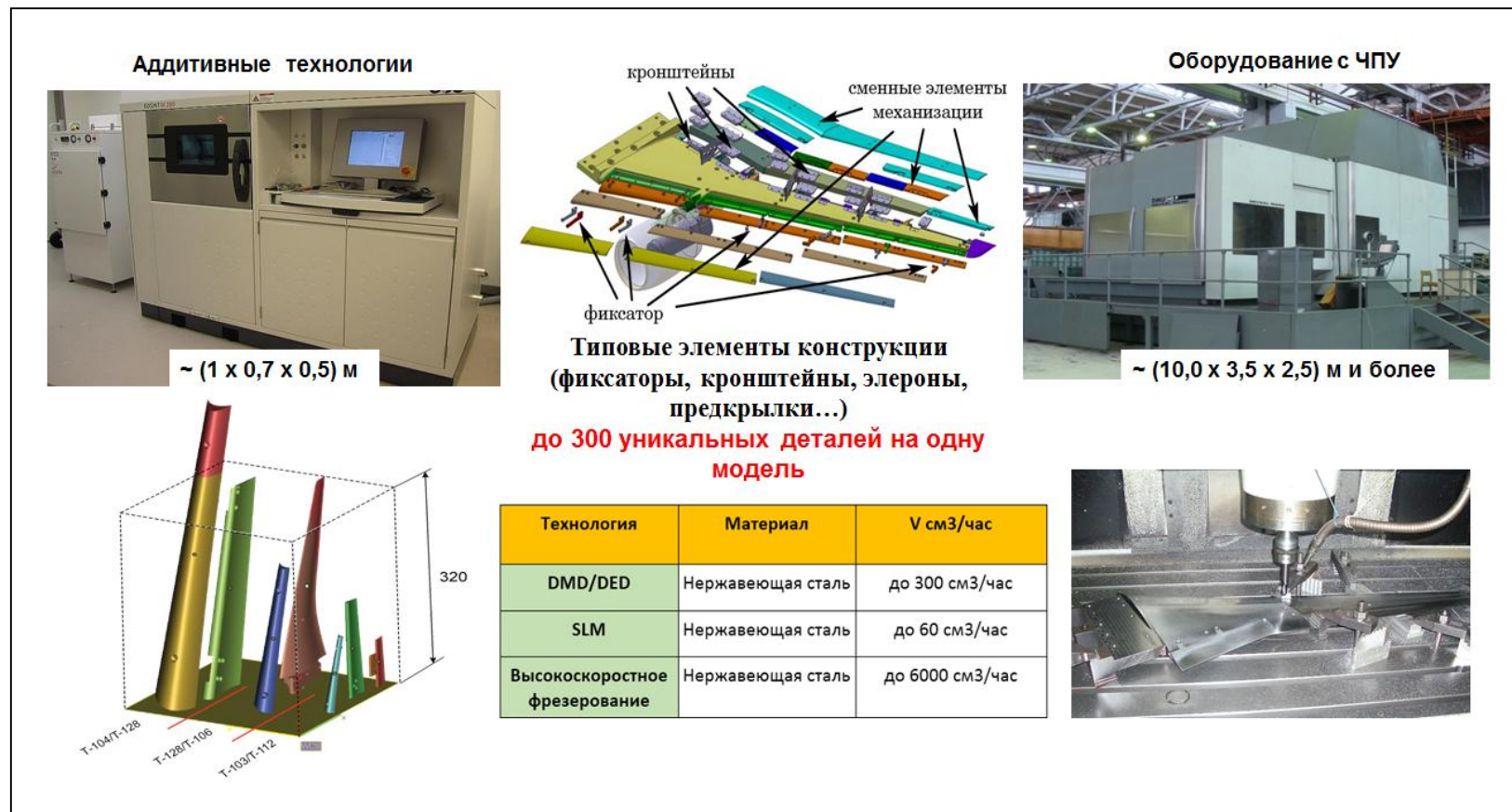


Рисунок 19. Выбор альтернативных производственных технологий

Заготовки в технологии DMD/DED изготавливаются с увеличенными припусками путем плазменного или лазерного расплавления напыляемого металлического порошка. Цена порошка существенно выше традиционного сортамента стальных плит, из которых вырезаются заготовки с использованием плазменной или гидрорезки. Консоли крыльев в аэродинамические трубы Т-104 и Т-128, а также фюзеляжи имеют характерные размеры 2,5-4,0 м и более. Они могут быть изготовлены только фрезерованием на крупногабаритных станках с ЧПУ, один из которых показан на рисунке 19. В этой связи была оценена целесообразность применения аддитивной технологии DMD/DED для изготовления заготовок.

Результаты анализа приведены на рисунке 20 для крупногабаритной модели консоли крыла. Для нее вырезка заготовки из плиты стали 30ХГСА и фрезерная обработка могут быть выполнены в течение 12 смен или 96н/час. Стоимость изготовления составит менее 350 тыс.руб. (в ценах 2023 года). Изготовление заготовки в аддитивной технологии DMD/DED потребует 33 смены или 266 н/час. Поскольку изготавливаемая в аддитивной технологии заготовка имеет меньшие припуски (более приближена к детали) время обработки на станке с ЧПУ сокращается до 7 смен (56 н/час). Общее время при изготовлении заготовки в аддитивной технологии составит 322 часа, по сравнению с фрезерованием, занимающим 96 часов. С учетом стоимости порошка цена изделия возрастает до 10 млн. руб.

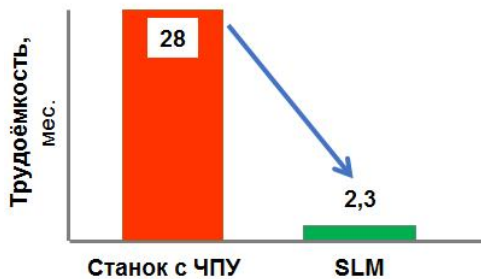
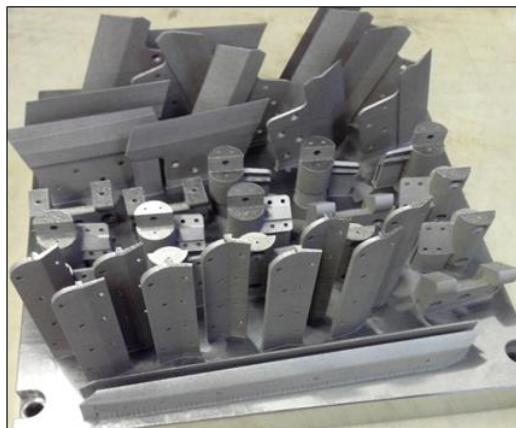
Применение аддитивной технологии DMD/DED изготовления заготовок с увеличенным припуском путем плазменного или лазерного расплавления напыляемого металлического порошка не целесообразно, как по временным затратам, так и стоимости.

Аддитивная технология селективного лазерного сплавления SLM существенно расширила возможности модельного производства по изготовлению особо сложных деталей аэродинамических моделей (показаны в таблице 2). Оценка целесообразности применения технологии для более простых деталей с размерами, обеспечивающими изготовление на штатных установках дана на рисунке 21. При традиционной механической обработке на станке с ЧПУ изготовление одной детали потребует не менее 2 смен или 16 н/час. Для всего объема деталей трудоемкость изготовления составит около 600 смен или 4800 н/час. Трудоемкость соответствует 28 месяцам или более 2-х лет работы. Стоимость деталей составляет более 7,5 млн.руб. В SLM-технологии при партионном размещении деталей в рабочей зоне аддитивной установке продолжительность изготовления составляет 50 смен или 400н/час, что соответствует трудоемкости 2,3 месяца или 17 суток. Стоимость деталей (с учетом порошкового материала) составляет 1,1 млн.руб., т.е. более чем



Высокоскоростное фрезерование	
Цены материала: <b>175 000 руб.</b> (50 руб./кг)	
Вырезка заготовки, обработка – удаление 2,8 т (1кг/мин) + чистовая 12 смен (96 час) Стоимость: 153 600 руб.	
Итого: <b>328 600 руб.</b>	
DED/ DMD	
Цены материала: <b>9 600 000 руб.</b> (12 000 руб./кг)	
1. Спекание , напыление (50 гр/мин) - 33 смены (266 час); 2. Чистовая ЧПУ - 7 смен (56 час) Стоимость: 515 200 руб.	
Итого: <b>10 115 200 руб.</b>	
Высокоскоростное фрезерование	CLAD/ DMD + ЧПУ
96 ч, 328 600 руб.	322 ч, 10 115 200 руб.

Рисунок 20. Сравнение технологий изготовления консоли крыла крупноразмерной аэродинамической модели



~ 300 деталей Масса деталей: 30г x 300 = 9 кг	
<u>Фрезерование на универсальном оборудовании с ЧПУ</u>	
Цены материала: 20 кг – <b>1000 руб.</b> (50 руб./кг)	
Изготовление заготовки и обработка одной детали: 2 смены (16час)	
Обработка: 600 смен ( <b>4800 час</b> ) Стоимость: 7 680 000 руб.	
Итого: <b>7 681 000 руб.</b> (28 мес.~ <b>2,3 года</b> )	
<u>SLM-технология</u>	
Цены материала: 9 кг – <b>108 000 руб.</b> (12 000 руб./кг)	
Изготовление 300 деталей – 50 смен ( <b>400 час</b> ) Стоимость: 1 000 000 руб.	
Итого: <b>1 108 000 руб.</b> (2,3 мес.~ <b>17 суток</b> )	
Фрезерование	SLM-технология
4800 час , 7 681 000 руб.	400 час, 1 108 000 руб.

Рисунок 21. Оценка затрат на изготовление механизации крыла фрезерованием на оборудовании с ЧПУ и в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (SLM)

в 5 раз ниже, чем в традиционной технологии, а сокращение трудоемкости и сроков изготовления более, чем в 10 раз (диаграмма на рисунке 21).

Полученные оценки показывают, что при обеспечении требуемых точностных характеристик деталей и их прочности внедрение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (SLM) является чрезвычайно перспективным.

### **3.5 Обеспечивающие операции изготовления деталей аэродинамических моделей в технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков**

Подготовка информации для изготовления деталей аддитивной технологии (SLM) начинается с разработки конструкций, выполняемой в одной из известных конструкторских САПР. Снижение коробления деталей в данной технологии требует разработки конструкций приблизительно равнотолщинных, в виде оболочек подкрепляемых внутренними сотовыми или сетчатыми структурами (рисунок 22а). Поскольку детали соединяются в конструктивные узлы и агрегаты, необходима разработка элементов сопряжений с галтельными переходами и анализ напряженно-деформированного состояния с уточнением параметров переходов (рисунок 22б). Также при конструировании оцениваются внутренние напряжения, обуславливаемые послойным сплавлением порошка (рисунок 22в). Партионное изготовление деталей требует разработки их рациональной установки на строительной платформе (рисунок 22г). Также выполняется подготовка технологической модели для отделения деталей от платформы, моделирование поведения при сплавлении и последующей термообработке, уточнение рациональных поддерживающих конструкций (рисунок 22 д, е, ж). Освобожденная от подпорок деталь подвергается технологическим измерениям для программирования финишной пост-обработки на оборудовании с ЧПУ (рисунок 22 з).

Разработка технологии финишной механической обработки деталей (иллюстрируется на рисунке 23). Включает выбор режущего инструмента, введение дополнительных технологических элементов в конструкцию детали для ее закрепления и базирования на станке, выбор рациональных параметров обработки, разработку управляющих программ и технологию контроля деталей перед механической обработкой и после ее проведения.

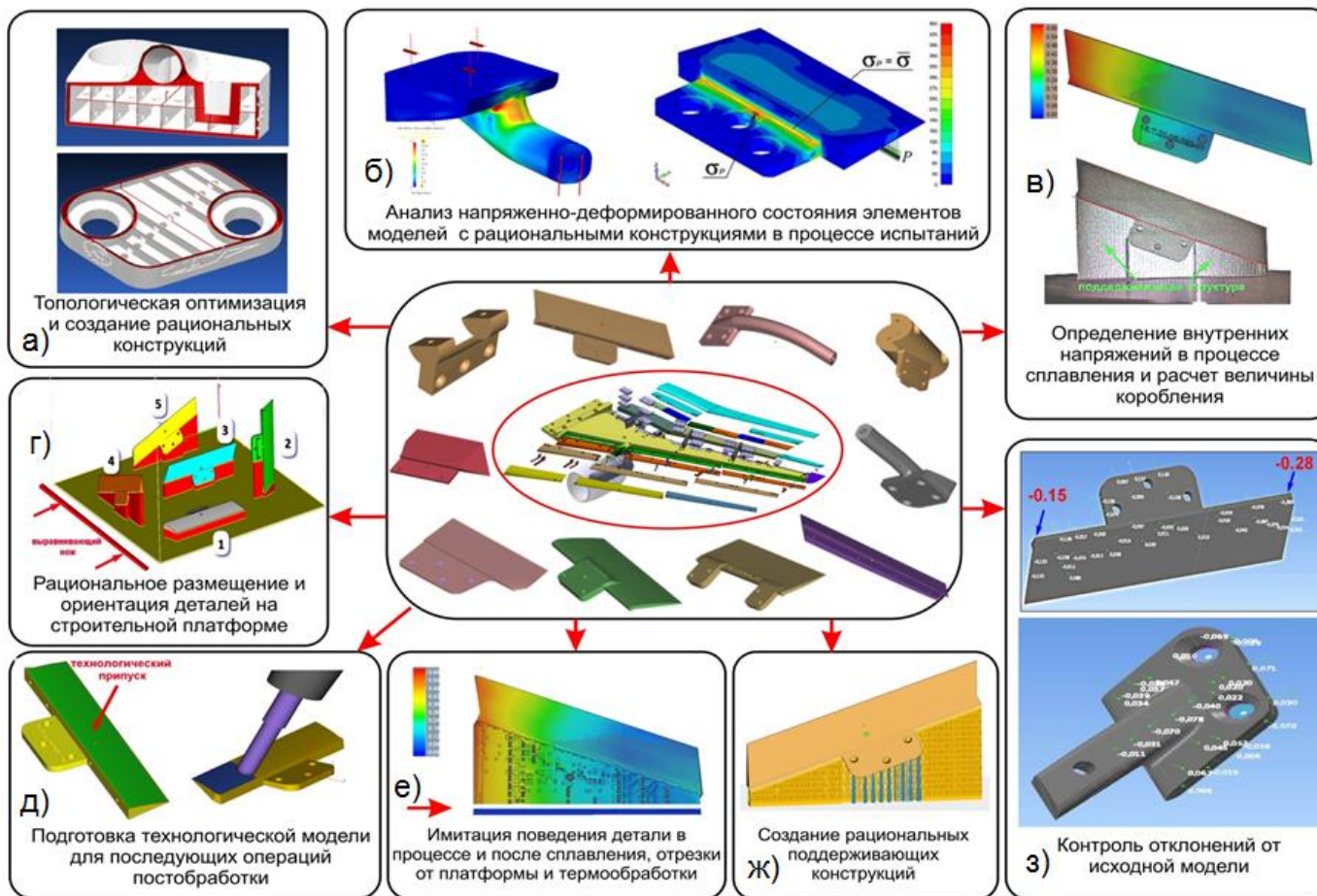


Рисунок 22. Построение цифровой модели детали и их партионного изготовления с геометрическим контролем

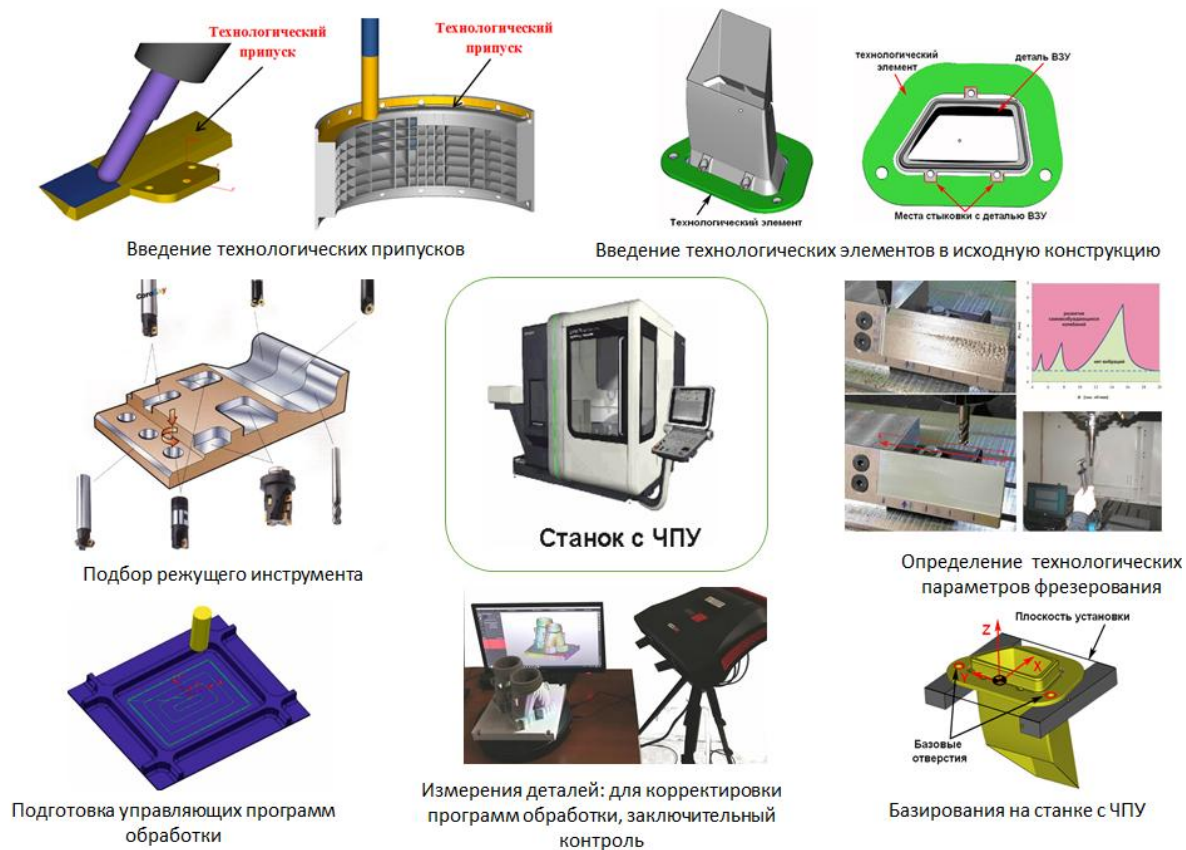


Рисунок 23. Подготовка обработки на оборудовании с ЧПУ

Завершается изготовление деталей финишной обработкой поверхности, которая выполняется в несколько этапов (рисунок 24). На первом, по завершению сплавления проводится пескоструйная и /или гидроабразивная обработка. После отделения опор выполняется виброгалтовка. При необходимости достижение особо высокого качества поверхности выполняется электролитно-плазменная полировка. Последовательно уменьшаемая шероховатость поверхности по этапам обработки составляет:  $R_a = 16 - 14 \text{ мкм}$ , после гидро-абразивной;  $R_a = 5 - 3 \text{ мкм}$ , виброгалтовка и механическое шлифование;  $R_a = 1,5 - 0,15 \text{ мкм}$ , после электролитно-плазменной полировки.

### 3.6 Повышение уровня модельного производства обеспеченное внедрением аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков

Внедрение аддитивных технологий радикально расширило номенклатуру деталей, сроков изготовления и обеспечиваемых

экспериментальных исследований ЛА для широкого диапазона скоростей, включая особо высокие.

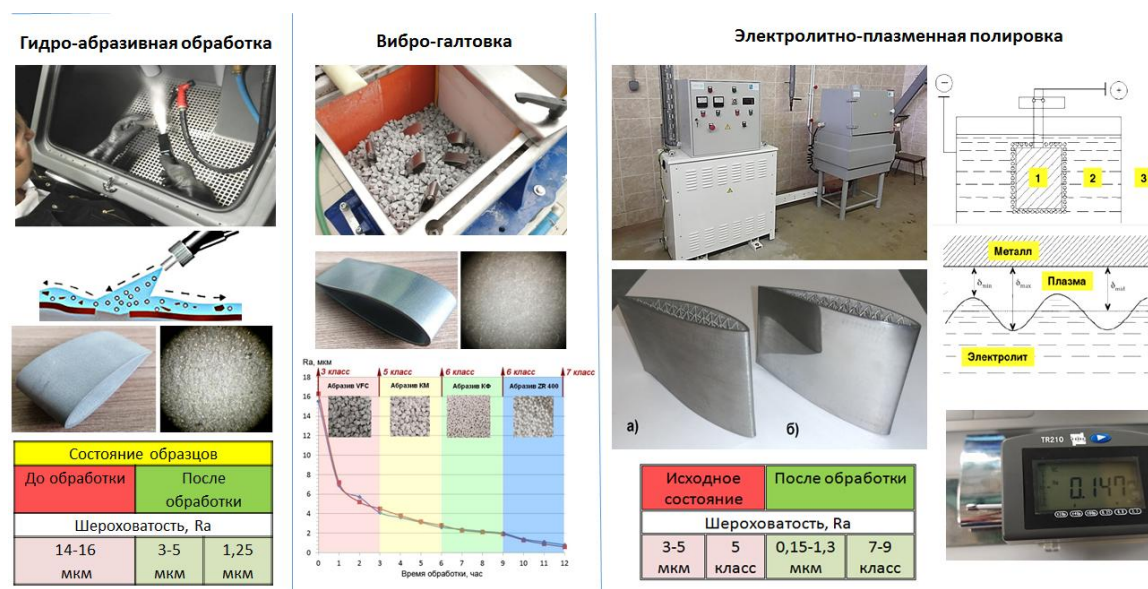


Рисунок 24. Повышение качества поверхности изготовленных деталей

Технология послойного отверждения фотополимеров лазерным и ультрафиолетовым излучением позволила выполнять оперативное изготовление формообразующей технологической оснастки для формования деталей из композиционных материалов (рисунки 4,5); специальных моделей для исследования новых физических эффектов (рисунки 9-11); разработать новые быстро изготавливаемые модели с выпуском индикаторных красителей для исследования физики обтекания в гидротрубах (рисунки 12-14); обеспечила возможности расширения экспериментальных исследований рациональных сопряжений агрегатов компоновки (рисунки 7-8) и обтекателей.

Аддитивная технологии селективного лазерного сплавления (SLM) металлических порошков обеспечила существенное снижение трудоемкости по сравнению с механической обработкой на станках с ЧПУ, сроков стоимости изготовления деталей ограниченной размерности (элементы механизации крыла, рули и элероны, фиксаторы и кронштейны и др.) составляющих 2-3 года, например для одного варианта крыла пассажирского самолета в 5-10 раз (рисунки 19, 21). Важнейшим итогом ее внедрения стало изготовление особо сложных деталей аэродинамических моделей, включая воздухозаборники, сопла, завихрители, других компонентов моделей турбореактивных двигателей (рисунок 25).



Рисунок 25. Особо сложные компоненты аэродинамических моделей

Данные модели были изготовлены для испытаний в натуральных условиях эксплуатации на стендах ЦАГИ и ЦИАМ. Они содержат: внутренние каналы, полости, протоки, перфорацию (не возможно изготовить на ЧПУ). При изготовлении получены минимальные толщины стенок до 0,1мм, диаметры внутренних отверстий до 0,3-0,5мм. Изготовлено 16 различных модификаций воздухозаборников и сопел.

Возможности аддитивной SLA-технологии позволили расширить состав средств измерения параметров воздушного потока за счет изготовления уникальных «гребенок» с наборами сопел и внутренних каналов, обеспечивающую минимизацию размеров и возмущения потока (рисунок 26) На рисунке также показан инновационный сферический насадок, изготовление которого в традиционной технологии металлообработки было не возможно. Предполагается его использование на натуральных ЛА.

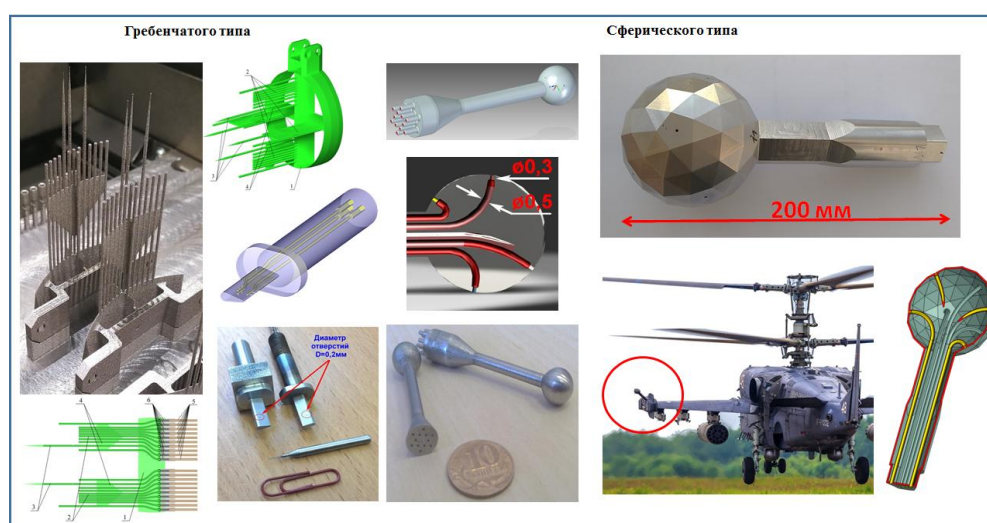


Рисунок 26. Инновационные измерительные устройства полного и статического давления

При дефиците времени на изготовление моделей освоено их производство преимущественно в аддитивных технологиях. В частности, 2 такие модели – аэродинамическая экраноплана и механизированная (с приводами винтов, поворотными мотогондолами) для испытаний в гидротрубе изготовлены непосредственно в аддитивных технологиях (рисунок 27). Причем модель для гидродинамических испытаний выполнена с электролитно-плазменной полировкой.



Рисунок 27. Аэродинамические модели полностью изготовленные с применением аддитивных технологий

С использованием аддитивной SLM-технологии был разработан и изготовлен специальный насадок-раздвоитель потока для модернизации акустической трубы ЦАГИ и выполнена доработка демонстратора соплового аппарата двигателя применительно к исследованиям по снижению шума (рисунок 28).



Рисунок 28. Исследования по снижению шума перспективного двигателя

## Заключение

1. Информационный анализ внедрения аддитивных технологий за рубежом, а также опытное применение на предприятиях аэрокосмической промышленности РФ показал возможность существенного расширения используемых в производстве аэродинамических моделей ЛА традиционных технологий. Применение аддитивных технологий целесообразно для снижения сроков изготовления деталей, выполняемых непосредственно по цифровым моделям в одной технологической операции, без затрат на изготовление заготовок. Особенно эффективно применение технологий при изготовлении особо сложных деталей агрегатов аэродинамических моделей (таблица 2), как высоко интегрированных изделий без операции сборки; оперативный улучшающей модификации поверхностей исследуемых на моделях аэродинамических компоновок по результатам расчетов или эксперимента (рисунки 7,8); оперативной проверки новых технических решений (рисунки 9,10,11), а также оперативном изготовлении формообразующей технологической оснастки (рисунок 5).

Выполнено сопоставление аддитивных технологий изготовления деталей из металлических порошков: послойного селективного лазерного сплавления (SLM) в емкости и напыления струей порошка, оплаваемого плазмой или интенсивным лазерным излучением (DED/DMD). Технология DED/DMD позволяет изготавливать заготовки особо больших габаритов (рисунок 20). Несмотря на существенно более высокую производительность (таблица на рисунке 19) заготовки изготавливаются с существенно большим припуском к цифровой модели деталей. Отсюда их использование, по сравнению с традиционной технологией обработки на станках с ЧПУ (рисунок 20), становится не рациональным: вырезка заготовок для крупногабаритных деталей аэродинамических моделей из плит штатного сортамента поставки существенно менее затратна; при высокой цене порошка стоимость изготавливаемой в аддитивном процессе заготовки в 10 раз выше. Внедрение SLM-технологии вследствие высокого геометрического приближения к цифровой модели становится чрезвычайно перспективным.

2. Внедрение технологий SLA и SLM в модельное производство ЦАГИ потребовало преодоление целого ряда технических и технологических проблем, включающих: импортозамещение полимерных (рисунок 2, таблица 1) и металлических (рисунки 15,16,17) порошковых материалов; разработку рациональных конструкций деталей, ориентированных на изготовление в аддитивной технологии (рисунки 4,13,18,22); освоение аналитических расчетов модификации конструкции для обеспечения необходимых прочностных характеристик и оценки рациональных параметров послойного изготовления (рисунок 22); разработки технологических процессов пост-

обработки для обеспечения точностных характеристик и качества поверхности (рисунки 23,24).

3. Определены детали, для изготовления которых аддитивные технологии становятся особо эффективными. В том числе накладки на обводообразующие поверхности аэродинамических моделей для отработки их формы по результатам расчетов или эксперимента (рисунки 7,8); детали механизации крыла (предкрылки, закрылки, дефлекторы, интерцепторы, рули, кронштейны-фиксаторы и др.) по габаритам соответствующие размерам рабочей зоны аддитивной установки (рисунки 19, 21), для которых возможно радикальное (до 10 раз и более) снижение трудоемкости и стоимости изготовления. Специальные модели для оперативной проверки новых технических решений и физических исследований в гидротрубах (рисунки 9,10,11,12,14). Особо сложные компоненты аэродинамических моделей, изготовление которых в традиционных технологиях существенно ограничено (рисунки 25,26,28).

4. Внедрение аддитивных тех результаты использовались при изготовлении как особо сложных, так и типовых деталей аэродинамических моделей в аддитивных технологиях, внедренных в изготовление моделей, наряду с традиционными технологиями опытного производства ЦАГИ.

Область применения: производство аэродинамических моделей, отработка аэродинамических характеристик натурных малоразмерных ЛА, оснащение аэродинамического эксперимента, обеспечивая радикальное снижение сроков изготовления при повышении качества. В 2023 году результаты работы использованы для изготовления более чем 20 аэродинамических моделей ЛА различного назначения, оперативной доработки стенда ресурсных испытаний консоли крыла магистрального пассажирского самолета и акустического стенда, а также доработки 6 малоразмерных ЛА для их улучшающих модификаций в трубных экспериментальных исследованиях. Данные работы выполнены для ряда государственных контрактов (Интеграл-МС, Интеграл-РС, СГС-Стриж, СГС-Сивил и др.), а также прямых договоров с разработчиками авиационной техники России.

## СПИСОК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОТЧЕТОВ ПО ТЕМЕ

1. Вермель В.Д., Козлов В.А., Шустов А.А.

Возможности применения полимерных моделей, “Литейное производство”, № 7, 1999 г.

2. заров Ю.А., Вермель В.Д., Корнушенко А.В., Новиков М.М., Камаев С.В., Марков М.А. Опыт и перспективы применения лазерной стереолитографии при изготовлении продувочных аэродинамических моделей различного назначения, лазерные и лазерно-информационные технологии. Фундаментальные проблемы и приложения, конгресс, 2001 г., труды, Суздаль, стр. 86, 0,05 п.л.

3. Yu. Azarov, V. Vermel, A. Konushenko, M. Novikov, S. Kamaev, M. Markov

Experience in laser stereolithography and its application in manufacturing wind-tunnel aerodynamics models of various purposes, Seventh International Conference on Laser and Laser-Information Technologies, Suzdal, Russia, 2001 г.

4. Патент № 2453820 на изобретение от 20.06.2012, Приоритет от 18.03.2010 Аэродинамическая модель из фотополимерного материала.

5. Камаев С.В., Марков М.А., Новиков М.М., Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Шардин А.О. Шустов А.А., Ходунов С.В. Применение SLA-технологии при изготовлении аэродинамических моделей самолетов. Стр. 498-506. Наука, 2016.

6. Вермель В.Д., Левицкий А.В., Николаев П.М. и др. Подготовка цифровых моделей имитации обледенения аэродинамических поверхностей самолетов для изготовления с использованием аддитивной SLA-технологии, стр.47-50, Авиационная промышленность, выпуск 1-4, 2020.

7. В.Д. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Комплексные исследования по применению селективного лазерного сплавления при изготовлении особо сложных элементов аэродинамических моделей спс/вгс из металлических порошковых материалов оптимизированных конструкций деталей аэродинамических моделей», НТО инв. № 11/348, Жуковский «ЦАГИ», 2020.

8. В.Д. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Исследование технологических возможностей повышения качества поверхности деталей моделей с аэродинамической профилировкой, изготавливаемых в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления», НТО инв. № 11/364, Жуковский «ЦАГИ» 2021.

9. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Разработка совмещенной комплексной технологии изготовления особо сложных деталей аэродинамических моделей селективным лазерным сплавлением с последующей финишной постобработкой на оборудовании с ЧПУ», НТО инв. № 11/371, Жуковский «ЦАГИ» 2021.

9. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Разработка рациональных конструкций элементов аэродинамических моделей применительно к изготовлению их в аддитивных технологиях из металлических материалов и отработка изготовления на установке селективного лазерного спекания», НТО инв. № 11/43, Жуковский «ЦАГИ» 2016.

10. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Исследование прочностных характеристик элементов конструкций аэродинамических моделей, изготавливаемых на установке лазерного сплавления из стального порошка с учетом влияния геометрических параметров деталей на их прочностные характеристики», НТО инв. № 11/323, Жуковский «ЦАГИ» 2018.

11. Вермель, В.В. Зиняев, Л.Л. Чернышев и др. «Исследование по созданию типовых элементов конструкции аэродинамических моделей на основе технологических возможностей установки лазерного спекания EOSINT M280», НТО инв. № 11/61, Жуковский «ЦАГИ» 2017.

12. Вермель, В.В. Зиняев, Л.Л. Чернышев и др. «Оценка трудоемкости и стоимости изготовления типовых элементов конструкции аэродинамических моделей в аддитивных технологиях по сравнению с традиционными технологиями изготовления на оборудовании с ЧПУ», НТО инв. № 11/326, Жуковский «ЦАГИ» 2018.

13. Вермель, В.В. Зиняев, Л.Л. Чернышев и др. «Исследование по оптимизации размещения деталей на строительной платформе установки и выбору рациональных поддержек для типовых элементов конструкции аэродинамических моделей, изготавливаемых в технологии селективного лазерного спекания». НТО инв. № 11/314 Жуковский «ЦАГИ» 2018.

14. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Расчетно-аналитические исследования для совершенствования конструкций и технологий создания аэродинамических моделей для экспериментальной отработки, разрабатываемых и модернизируемых ЛА с импортозамещением экспериментального оснащения и конструкционных материалов, в том числе, с использованием аддитивных технологий», Инженерная записка инв. № 11/379 Жуковский «ЦАГИ» 2023

15. Вермель, В.В. Зиняев и др. «Расчетно-аналитические исследования для совершенствования конструкций и технологий создания

аэродинамических моделей для экспериментальной отработки, разрабатываемых и модернизируемых ЛА с импортозамещением экспериментального оснащения и конструкционных материалов, в том числе, с использованием аддитивных технологий», Инженерная записка инв. № 11/378 Жуковский «ЦАГИ» 2023.

16. Вермель, В.В. Зиняев, Л.Л. Чернышев и др. «Рекомендации и методики по разработке конструкций аэродинамических моделей», НТО инв. № 11/002 Жуковский «ЦАГИ» 2009.

17. Вермель, В.В. Зиняев, А.О. Шардин и др. «Совершенствование изготовления элементов аэродинамических моделей и оснастки для их производства из фотополимеров в SLA-технологии (лазерная стереолитография): экспериментальное исследование рациональных конструкций оболочек и их подкреплений, оценка точности», НТО инв. № 10/3260 н/с Жуковский «ЦАГИ» 2003.

18. Вермель, В.В. Зиняев, А.О. Шардин и др. «Отработка оперативного изготовления элементов конструкции аэродинамических моделей (специальный крепеж, кронштейны и др.) методом быстрого прототипирования и точного литья по выжигаемым моделям», НТО инв. № 10/3636 Жуковский «ЦАГИ» 2007.

19. Вермель, В.В. Зиняев, А.О. Шардин и др. «Экспериментальная апробация комплексной системы проектирования и изготовления аэродинамических моделей самолетов на моделях перспективных ЛА», НТО инв. № 11/009 Жуковский «ЦАГИ» 2008.

20. Вермель, В.В. Зиняев, А.О. Шардин и др. «Определение деталей для которых наиболее рационально применение фотополимеров. Разработка конструкции деталей, в том числе: разработка конструкции деталей обледенения крыла (для двух нормируемых толщин накладок)», НТО инв. № 11/137 Жуковский «ЦАГИ» 2012.