

Применение инновационных методов проектирования и изготовления деталей ГТД

В настоящее время аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений производства газотурбинной техники. Внедрение в производство аддитивных технологий – принципиально нового способа формообразования – привело к кардинальной трансформации парадигмы разработки деталей, выражающейся в необходимости применения инновационных принципов проектирования, которые в сочетании с новыми технологическими возможностями дают максимальный синергетический эффект.

ПАО «ОДК-Сатурн» имеет более чем десятилетний опыт применения аддитивных технологий и обладает:

- ▶ компетенциями во всех основных направлениях аддитивного производства;
- ▶ замкнутой технологической цепочкой (проектирование с применением топологической оптимизации, послойный синтез заготовок деталей, термообработка и газо-изостатическое прессование, постобработка, контроль);
- ▶ необходимой инфраструктурой для аддитивного производства.

На ПАО «ОДК-Сатурн» ведутся работы по организации гибкого, серийного, высокоавтоматизированного цифрового аддитивного производства, способного обеспечить уникальными деталями ГТД потребности предприятий ОДК и отрасли в целом. В 2016 году более 600 деталей газотурбинных двигателей различного назначения были изготовлены с помощью аддитивных технологий из кобальтового, титанового сплавов, нержавеющей стали (рис. 1). В перспективных ГТД масса деталей, произведенных методом послойного синтеза, может составлять несколько процентов от общей массы двигателя.

Ключевые факторы, учитываемые при разработке дизайна деталей, изготавливаемых с применением

аддитивными технологиями, – это минимизация массы, площади поверхности, количества поддерживающих структур, времени построения, величины остаточных напряжений. Нахождение минимума массы распределения материала в силовых конструкциях обеспечивает топологическая оптимизация.

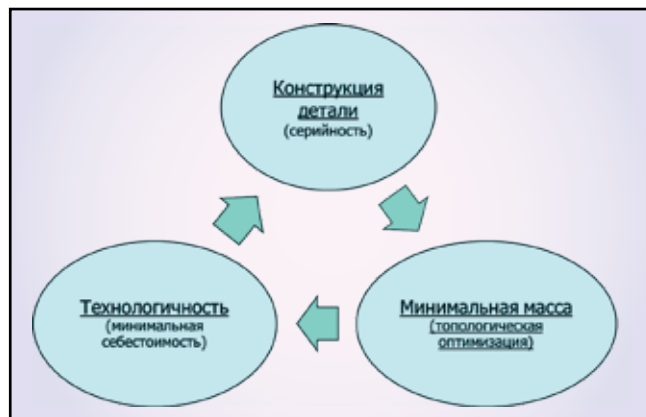


Рис. 2. Ключевые аспекты цикла разработки деталей, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий

Необходимо подчеркнуть, что применение подобных методов для разработки перспективных образцов деталей ГТД возможно только при высокой степени цифровизации процесса проектирования и производства, что в полной мере реализовано на ПАО «ОДК-Сатурн». На предприятии используется замкнутый, безбумажный цикл проектирования, ключевым элементом которого является 3D-модель, используемая для проектирования, расчетов, изготовления и контроля геометрии.

Ключевые аспекты цикла разработки деталей, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий, приведены на рис. 2. Важно отметить, что изображенные на рисунке три основных аспекта являются взаимосвя-

занными, что требует их комплексного совместного учета. При решении отдельных задач общая эффективность процесса проектирования существенно снижается. Кратко рассмотрим основные особенности вышеуказанных процессов.



Рис. 1. Примеры внедренных в конструкцию ГТД деталей, изготовленных послойным синтезом

Обеспечение минимальной массы

Нахождение варианта распределения материала в оптимизируемой детали с целью минимизации массы при заданном запасе прочности и максимальной жесткости обеспечивает топологическая оптимизация. Алгоритм топологической оптимизации определяет, какие силовые элементы нужны, как их расположить в пространстве и связать между собой. Исходными данными для решения подобной задачи являются габаритные (компоновочные или геометрические) ограничения и граничные условия, определяемые из особенностей работы конкретного объекта исследования.

На сегодняшний день на рынке коммерческого ПО представлено большое количество программных решений, которые предоставляют возможность решения задачи топологической оптимизации, учета технологических ограничений, обработки результатов оптимизации. К основным программным продуктам на данном рынке можно отнести: Altair OptiStruct, ANSYS Topology optimization, SolidThinking Inspire, MSC Nastran, CATIA GDE, Tosca Structure и другие. Данные программные продукты с успехом применяются в практике зарубежных компаний.

В рамках внедрения данного ПО на ПАО «ОДК-Сатурн» было проведено полномасштабное исследование и тестирование программных продуктов для топологической оптимизации. На основе комплекса критериев было выбрано наиболее подходящее ПО для решения поставленных задач и выпущена методика по применению подобных алгоритмов и ПО в процессе проектирования деталей ГТД. Использование алгоритмов топологической оптимизации позволяет в разы снизить массу переработанной детали, обеспечить ее требуемые прочностные характеристики.

Обеспечение технологичности (минимальная себестоимость)

Для получения эффективной геометрии детали, обладающей минимальной себестоимостью изготовления,

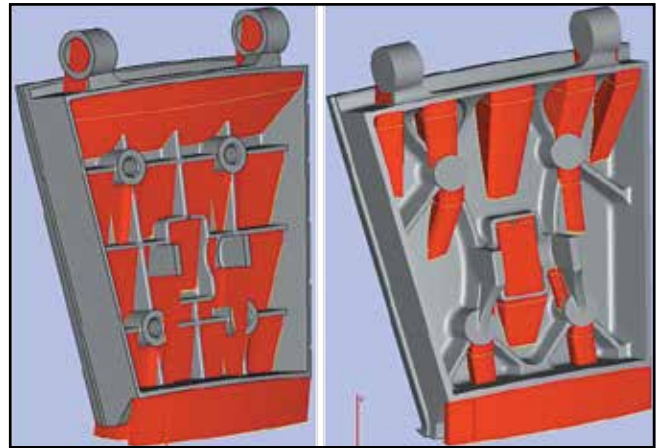


Рис. 3. Технологическая проработка конструкции под аддитивное производство с целью повышения КИМ

необходимо решать дополнительный комплекс задач, связанных с технологической проработкой детали и моделированием процессов изготовления. Ключевые факторы, учитываемые в данном аспекте проектирования, – это минимизация площади поверхности, количества и веса поддерживающих структур, времени построения, остаточных напряжений в конструкции.

Для решения этой задачи на ПАО «ОДК-Сатурн» применяются разнообразные программные решения и подходы. Так, для моделирования поддерживающих структур, адаптации расположения детали на столе используются различные программные комплексы (например, Magics21) в сочетании с алгоритмами параметрической многокритериальной оптимизации (IOSO NM) и непосредственным анализом конструкции. Подобный подход позволяет на 25-50% сократить относительный вес поддерживающих структур и время постобработки (рис. 3).

Для эффективного решения всех вышеперечисленных задач, стоящих при организации аддитивного производства деталей, на ПАО «ОДК-Сатурн» разработан и внедрен единый цикл проектирования и изготовления деталей с учетом особенностей аддитивных технологий (рис. 4).

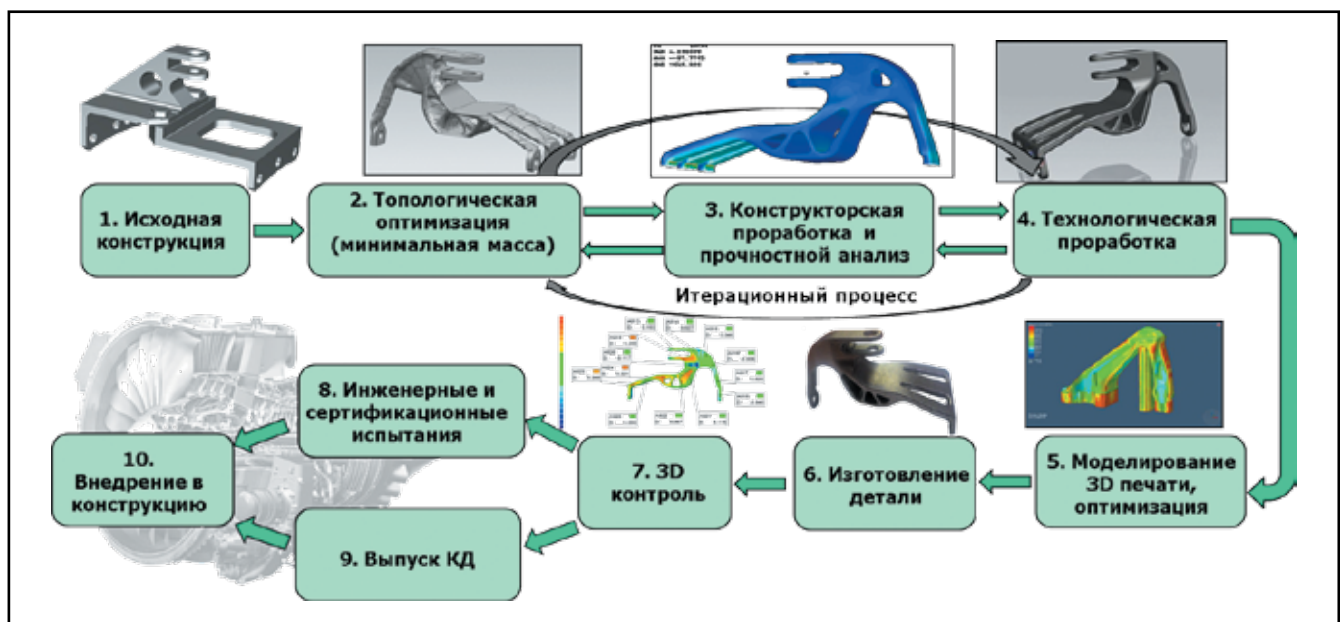


Рис. 4. Единый цикл проектирования и изготовления деталей под аддитивное производство

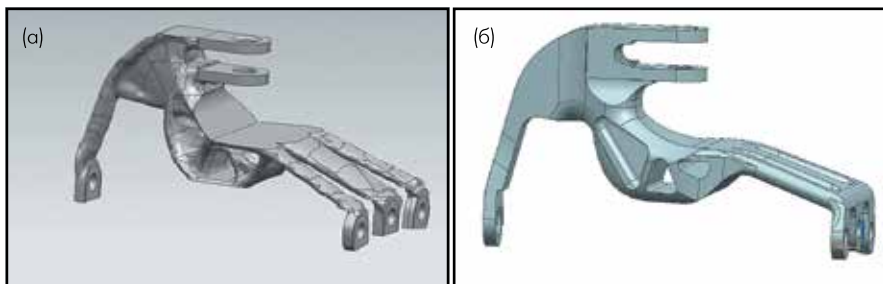


Рис. 5. Сравнение результата топологической оптимизации (а) и конструкторской проработки (б)

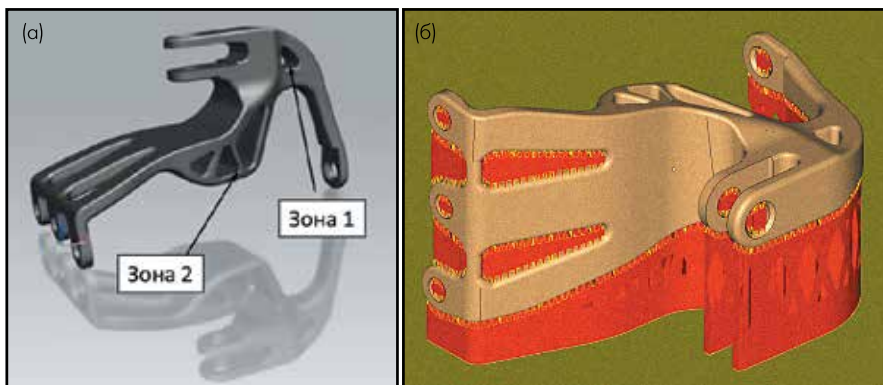


Рис. 6. Технологическая проработка детали (а) и пример генерации поддерживающих структур (б)

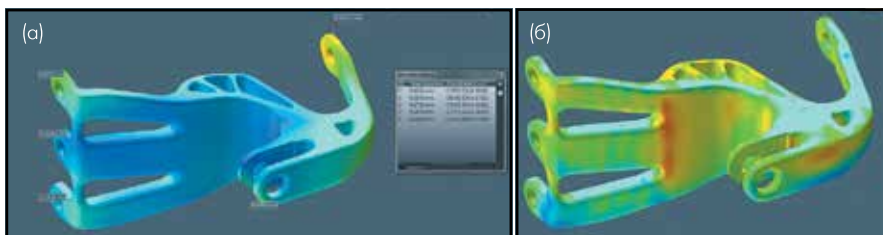


Рис. 7. Моделирование процесса изготовления аддитивными технологиями. Отклонения от исходной формы (а) и напряжения (б) в процессе 3D-печати

Цикл проектирования и изготовления в общем виде состоит из 10 основных пунктов, отмеченных на рисунке. Исходной точкой (п. 1) является либо геометрия существующей детали, изготавливаемой традиционным способом, либо ТЗ на деталь, которую необходимо спроектировать с нуля. Конструктор задает необходимые габаритные ограничения области оптимизации, граничные условия и формулирует задачу топологической оптимизации (п. 2). В качестве целевых функций могут быть использованы как минимизация массы или податливости конструкции, так и заданный уровень запасов прочности. Результатом топологической оптимизации является пространственная структура распределения материала. В прямом виде данный результат не может быть использован для дальнейшей работы, что диктует необходимость его конструкторской проработки (п. 3). Данный этап может выполняться как в стандартных CAD-системах на основе файлов формата *.stl, так и внутренними средствами программного комплекса топологической оптимизации (например, SolidThinking Inspire) (рис. 5).

На основании выполненной конструктором 3D-модели проводится поверочный прочностной расчет с использованием пакетов конечно-элементного анализа (ANSYS, Abaqus и т.д.). Как правило, по его результатам конструкция детали дорабатывается для обеспечения

заданного уровня прочностных характеристик.

Результаты данного этапа являются исходными данными для выполнения технологической проработки детали (п. 4 и рис. 6). В рамках технологической проработки геометрия детали может быть изменена для повышения коэффициента использования материалов (КИМ), сокращения количества поддерживающих структур и времени изготовления. На этом же этапе определяется положение детали на столе 3D-принтера при изготовлении. Результатом технологической проработки является существенное снижение количества поддержек и времени постобработки (на 20% и 15% соответственно для детали, приведенной на рис. 6).

Необходимо отметить, что для обеспечения эффективности процесса проектирования этапы с п. 2 до п. 4 необходимо выполнять итеративно, с обеспечением обратной связи между ними. На ПАО «ОДК-Сатурн» организовано конструкторско-технологическое плато с выделением соответствующих специалистов для снижения коммуникационных потерь и временных затрат на выполнение этапов цикла проектирования.

На сегодняшний день технологии численного моделирования процессов 3D-печати (п. 5) быстро развиваются и становятся неотъемлемой частью проектирования деталей под аддитивное производство. Существует несколько программных комплексов, позволяющих моделировать основные процессы производственной цепочки аддитивных технологий – изготовление, термообработка для снятия внутренних напряжений, обрезка и удаление опорной пластины, обрезка поддерживающей структуры, горячее изостатическое прессование (HIP).

На ПАО «ОДК-Сатурн» на этапе промышленного тестирования находится один из подобных программных комплексов разработки компании MSC Software. С его помощью возможно проведение численного исследования влияния параметров производственного процесса и используемых материалов, направлений обрезки и удаления поддерживающей структуры на деформации и напряжения в модели (рис. 7). При этом моделирование может осуществляться на макро- и микроуровне, что позволяет вычислять механические свойства и микроструктуру порошкового материала при сплавлении.

При использовании подобных подходов удается свести к минимуму искажения формы деталей и величину остаточных напряжений в детали после ее изготовления (п. 6).

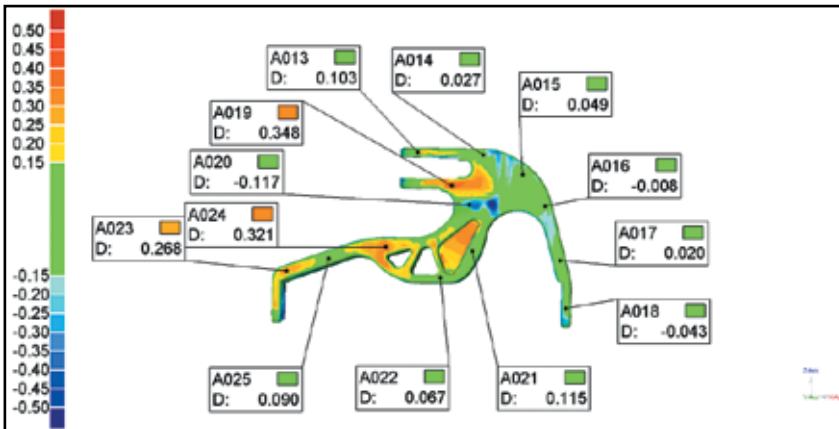
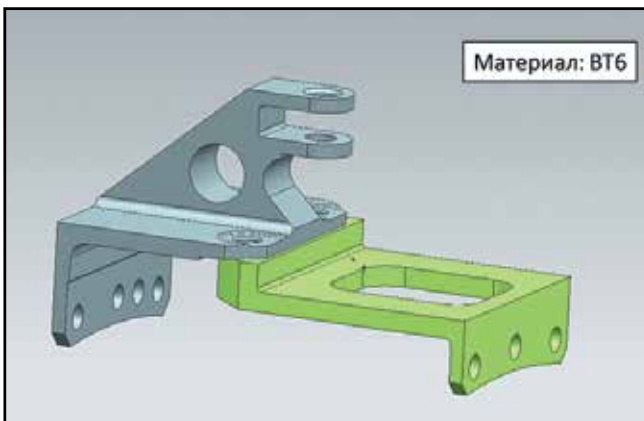
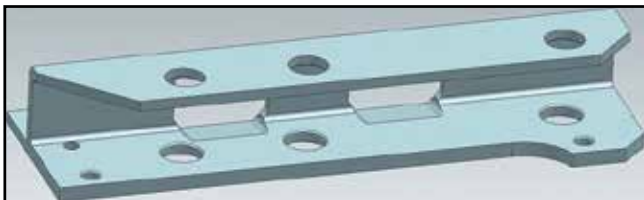


Рис. 8. Результаты 3D-контроля методами бесконтактной оптической оцифровки



а) Кронштейн (4 ДСЕ, m=250 г)



б) Плита МПЛ (1 ДСЕ, m=440 г)

Рис. 9. Исходные модели кронштейна и плиты МПЛ

Контроль геометрии и формы изготовленной детали (п. 7) осуществляется с помощью методов бесконтактной оптической оцифровки с использованием программного комплекса Geomagic Control X. На рис. 8 представлены результаты исследования одной из разрабатываемых и аддитивно изготавливаемых деталей. Как видно из рисунка, в результате обеспечивается высокий уровень соответствия изготовленной детали ее

математической модели (отклонения геометрии не превышают 0,35 мм).

Следующим этапом в цикле проектирования и изготовления является выполнение инженерных испытаний на установках (п. 8). По результатам инженерных испытаний верифицируются разработанные прочностные модели, оцениваются характеристики изготовленных деталей (предел прочности, критерии разрушения и т.д.). Инженерные испытания и выпуск конструкторской документации (п. 9), как правило, выполняются в параллельном режиме. Внедрение в серийную конструкцию (п. 10) возможно только после испытаний на двигателе и квалификации свойств металлопорошковой композиции, используемой для изготовления детали. На рис. 10 приведены примеры деталей, спроектированных и изготовленных в соответствии с предложенным циклом проектирования под аддитивное производство. Исходные модели деталей приведены на рис. 9.

Инженерные испытания деталей показали обеспечение требуемого запаса прочности при уменьшении массы кронштейна на 33%, плиты механизма поворота лопаток (МПЛ) на 48% и сокращении количества ДСЕ для кронштейна с 4 до 1. Оптимизированные детали были изготовлены на установке электронно-лучевого сплавления (ЕВМ) из металаллопорошковой композиции алюминиды титана и успешно прошли инженерные испытания, в настоящий момент они проходят испытания на опытных ГТД.

Выводы

- ▶ На ПАО «ОДК-Сатурн» успешно ведутся работы по организации гибкого серийного высокоавтоматизированного цифрового аддитивного производства, способного обеспечить уникальными деталями ГТД потребности предприятий ОДК и отрасли в целом.
- ▶ На ПАО «ОДК-Сатурн» разработан и внедрен единый цикл проектирования деталей под аддитивное производство, позволяющий сократить сроки разработки и внедрения в КД новых конструкций деталей и узлов, а также проводить технологиче-



а) Кронштейн (m=165 г)



б) Плита МПЛ (m=230 г)

Рис. 10. Оптимизированные детали, изготовленные методом ЕВМ

скую проработку с учетом изготовления АТ для максимизации КИМ и минимизации времени изготовления и количества поддерживающих структур.

- ▶ В рамках цикла проектирования на ПАО “ОДК-Сатурн” внедрена технология топологической оптимизации элементов ГТД с учетом изготовления аддитивными технологиями. Топологическая оптимизация всех деталей выполняется с учетом их метода изготовления (послойный синтез, литье и т.д.).
- ▶ По результатам применения разработанного цикла проектирования получено снижение массы деталей на 30-50%, необходимый уровень прочностных характеристик по статической и динамической проч-

ности, сокращение количества поддерживающих структур (экономия материала) относительно исходных деталей в 2 раза.

- ▶ Примененные методы и разработанный цикл проектирования деталей под аддитивное производство имеют значительные перспективы применения в других авиационных ГТД разработки ПАО “ОДК-Сатурн”.

**К. А. Виноградов, к.т.н.,
К. Р. Пятунин, К. В. Отряхина,
Д. В. Федосеев, П. Ю. Козляков,
ПАО “ОДК-Сатурн”**

НОВОСТИ

Dassault Systèmes и Airbus APWorks – сотрудничество по расширению использования аддитивных технологий в серийном производстве

Компания Dassault Systèmes), разработчик платформы 3DEXPERIENCE и мировой лидер в области решений для 3D-проектирования, создания цифровых 3D-макетов и управления жизненным циклом изделий (PLM), и компания Airbus APWorks GmbH, дочернее предприятие Airbus, специализирующееся на 3D-печати металлом, объявили о начале совместного партнерства, направленного на расширение использования аддитивных технологий (АТ) для крупномасштабного производства в аэрокосмической промышленности. В рамках партнерства планируется использование платформы Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE и экспертный потенциал APWorks в области консалтинга, проектирования и производства для совместных разработок виртуальной валидации процессов аддитивного производства.

Dassault Systèmes и APWorks расширят возможности отраслевого решения Co-Design to Target для разработки интегрированного процесса, который обеспечит цифровую целостность всех параметров проектирования, необходимых для изготовления деталей с помощью аддитивного

производства, в масштабах всей цепочки создания ценности. Это позволит сформировать весь процесс, начиная с оптимизации дизайна и заканчивая производством, тиражируемым и масштабируемым.

Благодаря аддитивному производству новые поколения деталей для аэрокосмической отрасли становятся более легкими и надежными. Конструкция и дизайн постоянно усложняются, появляются новые высокопроизводительные материалы и высокоскоростное оборудование, и сегодня технологии аддитивного производства используются уже не только при проектировании и создании прототипов творческих продуктов, но и постепенно становятся одним из основных способов промышленного производства по всему миру.

Виртуальные технологии могут ускорить это масштабное внедрение аддитивного производства. Партнерство Dassault Systèmes и APWorks призвано обеспечить единый источник данных как для работы над материалами, так и для производства и тестирования конечных деталей. Объединение инструментов для 3D-дизайна, проектирования и моделирования позволяет

оптимизировать детали для аддитивного производства, используя стандартизированные параметры, и таким образом обеспечивает их соответствие сертификационным стандартам. Последующие шаги, такие как тестирование, оптимизация и аддитивное производство, могут быть адаптированы к этим параметрам. OEM-производители смогут оптимизировать концептуальный дизайн, взаимодействуя со своими цепочками поставок для выполнения виртуальной валидации на каждом этапе, чтобы выявлять проблемы еще до производства деталей.

“Внедрение платформы 3DEXPERIENCE является важным шагом для организации тиражируемого и масштабируемого серийного производства. Моделирование позволяет предсказывать и избегать сбоев, – говорит Хоаким Зеттлер (Joachim Zettler), главный исполнительный директор APWorks. – В авиационной промышленности особое внимание уделяется вопросам безопасности, и для создания новых продуктов обычно требуется время. Благодаря виртуальной валидации процессов аддитивного производства мы можем ожидать появления сертифицированных дета-

лей, серийно изготавливаемых методами аддитивного производства”.

“Виртуальные технологии и аддитивное производство позволяют промышленным предприятиям создавать большее количество продукции при меньших затратах, с меньшим весом и при меньшей стоимости, при этом дизайнеры получают возможность работы со сложными формами, что было невозможно при традиционных производственных процессах, – отвечает Мишель Телье (Michel Tellier), вице-президент, аэрокосмическая отрасль, Dassault Systèmes. – Только сократив дистанцию между реальным и виртуальным мирами до нуля, промышленность сможет создавать и испытывать будущие разработки. Компания Dassault Systèmes объединяет усилия с ведущими новаторами в этой сфере, такими как APWorks, чтобы ускорить внедрение этих технологий в промышленность”.

Помимо сотрудничества в аэрокосмической отрасли партнерство компаний также нацелено на создание приложений для автомобильной промышленности, медицинской отрасли, а также робототехники и механического проектирования.

2 5 Л Е Т В С Е Г Д А Н А В Ы С О Т Е



МАКС

2017

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ
САЛОН**



Организаторы



МОСКВА • ЖУКОВСКИЙ • АЭРОДРОМ «РАМЕНСКОЕ» • 18–23 ИЮЛЯ