

Круглый стол

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Предлагаемая читателям дискуссия посвящена промышленной 3D-печати, или технологиям аддитивного производства, с развитием которых во всем мире связывают инновационный прорыв в машиностроении и приближение эры полностью цифрового производства. 3D-печать, или “аддитивное производство” (АП, также АМ – additive manufacturing), – это процесс создания трехмерных объектов практически любой геометрической формы путем последовательного нанесения (добавления) материала в противоположность традиционному, так называемому вычитающему производству, например механической обработке. Детали изготавливаются на основе 3D-модели, виртуально нарезанной на тонкие слои, которая передается в АП-систему для послойного формирования – “печатания” – конечного изделия.

Если еще недавно самые радужные ожидания в отношении аддитивных технологий связывались с формированием индустрии потребительских 3D-принтеров, а скептики советовали не возлагать далеко идущих надежд на новомодный тренд, то сегодня уже очевидно, что 3D-печать промышленных продуктов – это стремительно развивающийся рынок и одно из наиболее перспективных направлений развития мировой промышленности. Применение данных технологий позволяет на порядки ускорить проектирование и производство изделий, существенно удешевляет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и подготовку производства.

В сегодняшнем обсуждении своим мнением по проблемам развития и внедрения аддитивных технологий в отечественной промышленности делятся специалисты компаний-разработчиков программных решений для высокотехнологических производств, а также представители научно-экспериментальных кругов и производственных предприятий, уже имеющих практический опыт применения аддитивных технологий.

В Круглом столе принимают участие:

Евгений Каблов, академик РАН, генеральный директор, ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ;

Рустам Фасхутдинов, начальник бюро аддитивных технологий, АО “Авиадвигатель”;

Алексей Чехович, главный технический эксперт, компания CSD;

Эдуард Князев, руководитель технического отдела, компания MSC Software RUS;

Сергей Бутяга, технический менеджер, компания РТС Россия;

Дмитрий Ошкин, ведущий специалист, отдел развития производственных технологий, ПАО “ОАК”;

Денис Федосеев, заместитель главного инженера по аддитивным технологиям, ПАО “НПО “Сатурн”;

Даниэль Пизак, директор инженерного центра CATIA, компания Dassault Systemes;

Кирилл Виноградов, начальник бригады аэродинамики, акустики и динамической прочности, отдел систем инженерного анализа, ПАО “НПО “Сатурн”.

– В России внедрением технологий аддитивного производства занимается весьма ограниченное количество промышленных компаний. При этом они преимущественно продают оборудование зарубежного производства и предлагают услуги быстрого прототипирования, что для современного этапа развития аддитивного производства является вчерашним днем. Насколько целесообразна в России разработка АП-оборудования промышленного уровня отечественными производителями? Есть ли реальная заинтересованность со стороны российской промышленности в АП-технологиях, выходящих за рамки быстрого прототипирования? В каких отраслях?

Евгений Каблов, ВИАМ. Заинтересованность несомненно есть, особенно со стороны наукоемких отраслей – приборостроения, медицины, авиакосмической техники. Но самое главное, надо понимать, что аддитивным технологиям предстоит совершить революцию в промышленном производстве и создать основу для шестого технологического уклада. В настоящее время рынок аддитивных технологий интенсивно развивается во всем мире, и если мы упустим момент и не включимся самым энергичным образом в этот мировой тренд, то о конкурентоспособности нашей промышленности и наших товаров уже в ближайшем будущем, я думаю, не будет смысла даже говорить. В ВИАМ это отчетливо понимают, и нами выдвинуты перспективные инициативы по развитию отечественных аддитивных технологий и ликвидации образующегося отставания в этой области от мирового научно-технического сообщества.

Что касается создания отечественных машин для аддитивного производства, то разработка и изготовление такого оборудования, работающего на металлических порошках, в России ведется, но пока находится только в начальной стадии. У нас этим, в частности, занимаются в ОАО “Станкопром”. И первую такую установку вместе с университетом “Станкин” они уже сделали. Со своей стороны ВИАМ начал работать в этом направлении с Санкт-Петербургским политехническим университетом. Там при нашем участии тоже разрабатывают оборудование для аддитивных технологий, а также программное обеспечение по управлению АП-машинами.

Говоря о техническом обеспечении процессов аддитивного производства, необходимо иметь в виду и такую ключевую проблему, как производство порошков, поскольку от качества порошка в первую очередь зависит качество получаемых деталей.

Обычно каждая компания-производитель АП-машин предлагает покупателю и определенный набор порошков, и подробную инструкцию для настройки параметров машины под каждый из материалов, которая является результатом большой исследовательской работы компании. В этих инструкциях не сообщается состав металлопорошковых композиций и режимы сплавления, потому что все это является коммерческой тайной. Вы покупаете установку и с ней определенные порошки, и вам сообщают о режиме сплавления именно этих материалов. Соответственно, любые санкции – и все, производство остановилось. Некоторые наши фирмы, купившие за рубежом АП-машины, в итоге остались без порошков.

Поэтому в ВИАМ сейчас заняты разработкой технологий изготовления порошков и металлопорошковых композиций, которые позволят нам в том числе избавиться от этой зависимости. И мы уже наладили производство определенных их видов. Я говорю о металлопорошковых композициях, потому что в аддитивных технологиях применяются смеси порошков различного размера. Когда мы делаем математическую модель детали, мы рассчитываем, какое соотношение должно быть в композиции фракций разного размера, чтобы обеспечить максимальную плотность упаковки.

Специалисты нашего института впервые в России изготовили по аддитивной технологии с применением

отечественной металлопорошковой композиции деталь перспективного авиационного двигателя ПД-14. Работа проводилась в интересах нашего промышленного партнера ОАО “Авиадвигатель”. Деталь уже внесена в конструкторскую документацию и пошла в производство.

Также впервые в России полностью на базе аддитивного производства ВИАМ был изготовлен прототип малоразмерного газотурбинного двигателя для беспилотных летательных аппаратов. Работа проводилась совместно с Фондом перспективных исследований. Двигатель был изготовлен по новой технологии послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, которые также созданы специалистами института. Эта технология позволяет получить деталь в 30 раз быстрее, чем традиционными способами. Нам удалось напечатать детали двигателя с уникальными параметрами, например толщина стенки камеры сгорания этого двигателя составляет 0,3 мм. Таких параметров можно достичь, только используя 3D-печать.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”. Зарубежный опыт и опыт АО “Авиадвигатель” показывает, что аддитивный метод производства действительно уже вышел за рамки прототипирования, дав промышленности новые возможности при производстве таких наукоемких изделий, как авиационный двигатель. Именно авиационная промышленность стала основной платформой внедрения аддитивных технологий как самостоятельного метода производства.

Разработка отечественного оборудования интересна именно с точки зрения снижения его стоимости, однако надо понимать, что для рентабельности данного производства необходимо ориентироваться на внешний рынок, а он уже занят серьезными конкурентами. Поэтому необходимо предлагать не аналоги существующего оборудования, а разрабатывать нечто абсолютно новое.

Алексей Чехович, компания CSD. Основной причиной медленного продвижения отечественных разработок на российском рынке аддитивных технологий является нестабильная экономическая ситуация в стране. Ведь главным двигателем развития технологий выступают в первую очередь инвестиции частного бизнеса в ту или иную отрасль. А поскольку частный капитал в России не заинтересован в долгосрочном инвестировании крупных средств в аддитивное производство, что для рынка 3D-печати необходимо, на сегодняшний день развитие отечественных технологий происходит очень медленно.

Эдуард Князев, компания MSC Software. Аддитивные технологии в промышленности – это технологии будущего, которое на наших глазах становится настоящим. Ожидаемый рост на этом рынке превышает 25% в год. И сейчас очень хороший момент для российских предприятий начать разработку и внедрение отечественного АП-оборудования. С одной стороны, имеется возможность избежать “детских” болезней технологии, воспользовавшись наработанным опытом зарубежных производителей, с другой стороны, потенциально есть большой и стремительно растущий рынок для такого оборудования. Ключевые отрасли для аддитивных технологий – это производство товаров народного потребления



Евгений Каблов,
ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ



Рустам Фасхутдинов,
АО "Авиадвигатель"



Алексей Чехович,
компания CSD



Эдуард Князев,
компания MSC Software

ния, двигателестроение, медицина, автомобилестроение, а также аэрокосмос.

Сергей Бутяга, компания РТС. Заинтересованность в аддитивных технологиях характерна прежде всего для российских предприятий авиационной промышленности. Технологии АП позволят перейти к разработке изделий без дополнительных "болтов и гаек", что поможет на треть облегчить крупные неподвижные узлы. Если при этом использовать технологии лазерного спекания и напыления совместно с традиционными технологиями "точения", то получатся точные, "чистые" металлические поверхности, которые без каких-либо проблем на этапах сборки можно совместить с деталями изделия.

Дмитрий Ошкин, ПАО "ОАК". Потребность в отечественных разработках АП-оборудования, конечно, есть, мы все прекрасно понимаем, что необходимо избавляться от зависимости от зарубежных поставщиков, особенно если речь идет о продукции оборонного характера, когда в любой момент времени вам могут "перекрыть кислород" под надуманными предложениями.

– Учитывая высокую стоимость и низкую производительность существующих промышленных систем 3D-печати, для каких задач в настоящее время целесообразно их применение в машиностроительном производстве? Какие преимущества в этих случаях достигаются по сравнению с традиционными производственными технологиями?

Денис Федосеев, ПАО "НПО "Сатурн". Не могу согласиться с такой оценкой производительности существующих промышленных решений. Переход на аддитивное производство уже сейчас позволяет в разы сократить цикл изготовления деталей по сравнению с традиционной механообработкой и в десятки раз – по сравнению с литейным производством. К тому же на текущий момент практически все мэйджоры уже имеют в своих линейках мультилазерные комплексы с расширенными рабочими зонами, дающие существенный прирост производительности по сравнению с наиболее распространенными на данный момент однолазерными системами. В целом применение 3D-печати позволяет снять многие конструкторские и технологические ограничения, например в отно-

шении использования материалов, формообразование которых с помощью традиционных технологий невозможно или слишком затратно. Отсутствие таких ограничений в области проектирования – это максимальная свобода дизайна, возможность интеграции различных элементов в единую конструкцию, а применение при этом инновационных принципов проектирования, таких как интеллектуальная топологическая оптимизация с учетом действующих нагрузок (включая применение так называемого "бионического" дизайна), дает максимальный синергетический эффект. Что касается высокой стоимости, уже сейчас стоимость оборудования для промышленной 3D-печати сопоставима со стоимостью высокотехнологичных специализированных обрабатывающих центров. В ближайшем будущем прогнозируется еще более значительное падение цен и на 3D-оборудование, и на металлопорошковые композиции, что делает аддитивные технологии еще более конкурентоспособными и способствует их обширному внедрению не только в традиционных для них областях, таких как аэрокосмос и медицина, но и в таких консервативных, как автопромышленность, где внедрение инновационных технологий обуславливается только экономической целесообразностью.

Эдуард Князев, компания MSC Software. Несмотря на несомненные достоинства этой технологии, существующие промышленные системы 3D-печати имеют и явные недостатки. Однако многие из этих недостатков могут быть нивелированы при использовании компьютерного моделирования, которое позволяет быстро и с малыми затратами проводить виртуальную отработку технологических процессов. Комбинация расчетных и экспериментальных методов позволяет существенно расширить области применения аддитивных технологий в промышленности. В первую очередь это быстрое создание опытных образцов и производство деталей малыми партиями, а также производство деталей сложной формы, которые невозможно произвести другими способами. К преимуществам АП-технологий можно отнести возможность создания сложных сборок без необходимости соединять множество частей друг с другом. Важная область использования этих технологий – ремонт деталей, например восстановление лопаток авиационных двигателей. Основные преимущества аддитивного производства – это оперативность, создание более легких



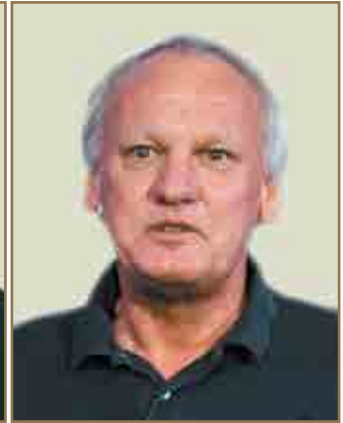
Сергей Бутяга,
компания РТС



Дмитрий Ошкин,
ПАО "ОАК"



Денис Федосеев,
ПАО "НПО "Сатурн"



Даниэль Пизак,
компания Dassault Systemes

деталей из меньшего количества материала с меньшим количеством отходов и с меньшими затратами энергии; отсутствие необходимости использования дополнительного оборудования (прессов, штампов и т.п.).

Сергей Бутяга, компания РТС. Промышленные системы 3D-печати до сих пор используются прежде всего для быстрого прототипирования моделей. В XXI веке такие "традиционные технологии", как использование сколки и пластилина, должны быть постепенно забыты. Сегодняшние сборочные узлы содержат в себе большое количество компонентов, которые просто необходимо отрабатывать "на собираемость". Это можно делать либо "в голове", либо на макетах, напечатанных в 3D. На 3D-принтере можно также создать специальную оснастку, которая в некоторых случаях может понадобиться для отработки сборочных операций и обязательно потребуется на опытном производстве. Все зависит от используемой "на конвейере" технологии и от размера самого "конвейера".

Алексей Чехович, компания CSD. В зарубежной практике предприятия машиностроения уже очень активно используют аддитивные технологии в производственных циклах, производстве оснастки и конечных изделий, а также в прототипировании. Большой потенциал внедрения этих технологий имеется и на российских предприятиях. Современные АП-технологии позволяют производить изделия с уникальной геометрией, которую если и возможно воспроизвести стандартными технологиями, то с большими финансовыми и временными затратами. Также уже на данном этапе развития 3D-технологий мы видим, что материалы, используемые в стандартных технологиях, при помощи АП-разработок приобретают иные физико-механические свойства, имеющие преимущества перед характеристиками материалов, применяемых при изготовлении изделий с помощью методов традиционного производства. Не стоит забывать и о прототипировании, которое позволяет получить несколько вариантов изделия за короткий срок без создания сложной технологической оснастки.

Дмитрий Ошкин, ПАО "ОАК". Утверждение, что промышленные системы 3D-печати имеют низкую производительность и высокую стоимость, является не совсем корректным. Есть ряд задач, где применение аддитивных технологий приносит значительные выгоды в

отношении как стоимости продукции, так и времени изготовления, за исключением случаев серийного и крупносерийного производства изделий. Наиболее ощутимым плюсом применения аддитивных технологий, как уже указывалось, является возможность изготавливать изделия, которые принципиально невозможно изготовить методами традиционного производства, а если на этапе проектирования изделия применять методы топологической оптимизации конструкций, то для традиционных технологий просто не найдется места, и это как раз тот случай, когда выигрыш от использования АП будет в разы выше как по стоимости изготовления, так и по времени получения изделий. Необходимо конструктивно подходить к применению той или иной технологии, бездумное использование, как правило, приводит к негативным результатам.

Евгений Каблов, ВИАМ. У аддитивных технологий есть своя ниша – делать то, что невозможно сделать посредством традиционных технологий. Например, можно вырастить "деталь в детали", можно сформировать деталь с переменными по толщине свойствами материала, можно выращивать сетчатые конструкции, которые невозможно получить ни литьем, ни механообработкой (например, очень сложные системы охлаждения), и при этом можно заменить целые узлы, собранные из нескольких деталей, одной деталью. Или можно изготавливать детали, спроектированные на основе бионических принципов, то есть попытаться делать их так, как делает природа. АП-технологии позволяют упростить получение сложных по форме и нетехнологичных при современном уровне развития промышленности изделий. Сочетая современные информационные технологии и технологии послойного спекания, можно получать изделия сложной формы без необходимости последующей трудоемкой обработки резанием.



Кирилл Виноградов,
ПАО "НПО "Сатурн"

Огромным преимуществом технологий 3D-печати является то, что они позволяют использовать практически ровно то количество материала, которое необходимо для готовой детали. Исследования британских ученых показали, что экономия сырья при использовании аддитивных технологий может достигать 75%.

Если первые АП-системы были предназначены для производства изделий преимущественно из полимерных материалов, то сегодняшние установки способны производить детали из металлов, что существенно расширяет области их использования. Уже доказано, что металлические изделия, напечатанные на 3D-принтерах, по своим свойствам – плотности, остаточному напряжению, механическому поведению, неравновесной микроструктуре, кристаллографической текстуре – отличаются в лучшую сторону от изделий, изготовленных литьем, методами деформации и механической обработкой. Кроме того, сегодня пока еще трудно представить, какое количество людей сможет освободиться от тяжелого и малопродуктивного труда, связанного с производством заготовок и их механической обработкой при создании деталей промышленных изделий, а также с последующей переработкой отходов производства.

К преимуществам аддитивных технологий можно отнести не только произвольность формы изготавливаемых изделий и их качество, но и возможность моментальной передачи цифровых моделей в любую точку мира, что позволяет при необходимости сразу организовать их локальное производство в мировых масштабах. Стоимость таких деталей выше, чем изготовленных традиционными методами, но технологии “выращивания” отвечают современной тенденции повышения гибкости производственных процессов.

Аддитивные технологии имеют также огромный потенциал в области снижения энергетических затрат на производство самых разнообразных видов продукции.

**– Любая развивающаяся технология под-
ходит к состоянию, когда для ее дальней-
шего развития должны решаться вопросы
стандартизации. В сфере аддитивных тех-
нологий также уже назрела потребность в
нормативной базе, которая бы определяла
единую систему сертификации и стандар-
тизации аддитивных изделий, материа-
лов, технологических процессов, возмож-
но, устройство и принцип действия самих
аддитивных установок. Между тем боль-
шинство АП-установок имеют закрытую
архитектуру, их производители патенту-
ют процессы управления оборудованием,
технологии обработки материалов, прак-
тически превращая свои установки в “чер-
ный ящик”. Это, естественно, серьезно
ограничивает возможности производител-
ей конечных изделий и тормозит процесс
разработки новой продукции, для чего, соб-
ственно, и были созданы эти технологии.
Принимаются ли в настоящее время меры
для разрешения этой ситуации?**

Дмитрий Ошкин, ПАО “ОАК”. Вопрос абсолют-
но правомерный и затрагивает наиболее острый аспект
промышленного применения аддитивных технологий. От-
сутствие стандартов – это тот фактор, который как ника-
кой другой тормозит дальнейшее продвижение в области
аддитивного промышленного производства. ПАО “ОАК”
входит в технический комитет ТК 182, организованный
ФГУП “ВИАМ”, где принимает активное участие в раз-
работке стандартов, без которых внедрение аддитивных
технологий в аэрокосмической промышленности практи-
чески невозможно.

Эдуард Князев, компания MSC Software.
В настоящее время компания MSC Software разрабаты-
вает специализированное программное обеспечение
для компьютерного моделирования процесса печати на
3D-принтерах деталей из металлов. Одной из планиру-
емых функций этого ПО будет двусторонний обмен фай-
лами между ПО и 3D-принтерами. Таким образом, этот
пакет сможет служить интегрирующей средой для АП-
установок.

Сергей Бутяга, компания РТС. Основная проб-
лема аддитивного производства в области стандарти-
зации – это отсутствие единого формата файлов для
обмена данными с машинами 3D-печати, как в пластике
ABS, так и в порошковом металле. Не так давно РТС при-
соединилась к отраслевой ассоциации 3MF Consortium и
совместно с ведущими производителями сейчас активно
участвует в создании такого формата под рабочим на-
званием 3MF. Наша цель – предоставить проектиров-
щикам всю нужную информацию о производственных
возможностях и оптимизировать весь процесс – от раз-
работки концепции до непосредственно 3D-печати ком-
понентов.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”.
С точки зрения интересов промышленности закрытая
архитектура – это не проблема, если она обеспечивает
стабильность. Более того, отсутствие возможности
вмешиваться в настройки системы позволяет говорить о
предсказуемости результата.

Особенностью аддитивного оборудования являет-
ся возможность всесторонней автоматизации процесса
получения заготовки, вплоть до формирования структуры
материала, и именно здесь требуется серьезная научная
работа, обеспечивающая промышленные потребности.
Промышленности не нужна открытая архитектура, про-
мышленное производство требует стабильности при
меньших трудозатратах, и у аддитивных технологий есть
все возможности, чтобы это обеспечить.

Евгений Каблов, ВИАМ. Нет сомнений, чтобы дви-
гаться дальше, необходимо разработать систему серти-
фикации и стандартизации аддитивных изделий, чтобы
все понимали все однозначно и можно было требовать
от разработчиков соблюдения стандартных требова-
ний. Должна существовать нормативная документация,
которая четко определяет, что понимается под аддитив-
ными технологиями, какие требования предъявляются к
материалу, к металлопорошковой композиции, в каких
условиях получается порошок, каким методом, каким
требованиям должны отвечать модели, технологии, обо-
рудование и сами детали. ВИАМ прилагает очень се-

резные усилия, чтобы внести свой вклад в создание системы национальных стандартов для аддитивного производства.

Денис Федосеев, ПАО “НПО “Сатурн”. Попытаюсь развеять очередной миф вокруг аддитивных технологий в части того, что 3D-печатающее оборудование – это “черный ящик”, закрытые параметры и т.д. Начнем с того, что конечный пользователь в большинстве своем готов покупать только комплексное, законченное решение, так сказать, “из коробки”. После инсталляции оборудования и прохождения первого уровня обучения он должен иметь возможность изготавливать детали с известными свойствами из необходимого материала. Технология получения синтезируемой АТ-детали из металла – это совокупность конкретного оборудования АП, конкретной металлопорошковой композиции (МПК) и технологических параметров, разработанных для этого оборудования и МПК, поэтому в каталоге любого вендора можно найти определенный набор основных, наиболее востребованных материалов с перечнем их свойств в порошковом и синтезированном состоянии. Стоимость работ по выпуску на рынок одного материала, по заявлениям разработчиков, составляет около 2 млн евро, и по времени этот процесс занимает около двух лет, и это с учетом наличия у производителей оборудования собственной методики подбора оптимальных технологических параметров синтеза. Данный итерационный процесс непосредственно связан и с производителями металлопорошковых композиций, так как требуется МПК не только конкретного химического, но и определенного морфологического и фракционного состава. Итогом этой гигантской работы, проведенной разработчиком оборудования, является:

- ▶ паспорт на конкретную МПК, в котором отражены: химический состав, физические свойства, прочностные характеристики “сырого” (то есть после процесса синтеза) и термообработанного материала, с учетом анизотропии, если она имеется, с указанием режимов термообработки для достижения этих свойств, а также гигиенический сертификат, сертификат пожаробезопасности и много еще всего, что к обсуждаемому вопросу имеет косвенное отношение;
- ▶ набор оптимальных технологических параметров (а в установках, работающих с металлопорошковыми композициями, этих параметров может быть более двух сотен, и, что естественно, для каждого производителя оборудования они свои), при которых пользователь, использующий указанную МПК на конкретном оборудовании, для которого они разрабатывались и оптимизировались, гарантированно получит задекларированные в паспорте свойства.

Далее, при покупке оборудования пользователь как опции набирает необходимую номенклатуру материалов, получая в виде лицензии технологические параметры процесса для каждого конкретного материала. Параметры могут быть как закрытые, поскольку большинству конечных пользователей никогда не требуется что-либо менять – все уже оптимизировано

(зачем, скажем, производителю имплантов заниматься изменением параметров синтеза, если его задача – получать детали со стабильными свойствами, указанными в паспорте на материал), так и открытые, с возможностью редактирования, которая необходима, скажем, при переходе на другие МПК или для решения специфических задач изменения процесса синтеза с возможностью “тонкой” коррекции базовых параметров. Но необходимость в этом появляется, как правило, только после длительного периода эксплуатации. Поэтому при возникновении таких потребностей есть возможность пройти следующий уровень обучения и “открыть” параметры (если они закрыты на редактирование и изменение) путем приобретения дополнительной лицензии. Требуется также заметить, что при переходе на серийное производство сертификация и последующее производство проходит на “замороженных” технологических параметрах, так как изменение даже одного из них априори ведет к процессу пересертификации.

Таким образом, наличие МПК и готовых технологических параметров под них не только не тормозит, а наоборот, является локомотивом процесса внедрения АП и разработок новой продукции. На текущий момент на рынке промышленного “металлического” 3D-оборудования нет ни одной установки, на которой изменение параметров процесса было бы невозможно для пользователя. Вопрос на самом деле в другом – а что делать с этими возможностями, имеются ли ресурсы и компетенции у пользователей, чтобы вкладываться в разработки новых МПК и разрабатывать под них оптимизированные параметры процесса синтеза с нуля? В России на сегодня – нет. И должен ли этим кто-то заниматься?

– Каким требованиям должны отвечать системы автоматизированного проектирования, конструирования и производства (CAD/CAM/CAE-системы), чтобы их можно было эффективно применять в задачах аддитивного производства? Предлагает ли сегодняшний рынок успешно зарекомендовавшие себя системы такого рода?

Сергей Бутяга, компания РТС. 3D САПР CREO 4.0 уже соответствует требованиям технологий аддитивной печати, если говорить о разработке изделий из ABS и лазерном спекании. Основная задача ПО – обеспечить читаемость на станках и возможность передачи между ними всех “баз” в модели (то есть плоскостей, по которым производятся замеры при печати моделей и последующей резке на традиционных станках с ЧПУ). При этом желательно отладить технологию работы в “гибких производственных ячейках” (автоматизированные совмещенные технологические этапы с подачей и выемкой материала и готовых деталей). Сами поставщики машин для 3D-печати также поставляют ПО, необходимое для отработки технологии печати. Другое дело, что это ПО, что называется, “понятия не имеет” о технологиях производства не только детали для печати, но и для всего ее окружения в изделии, которое может

включать и электрику, и мехатронику, не говоря уже о встроенном программном обеспечении.

Эдуард Князев, компания MSC Software.

Корпорация MSC Software помимо пакетов общего назначения предлагает ПО для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением, сварки и термообработки. Это программный пакет Simufact, в составе которого один из модулей – Simufact Additive как раз и предназначен для компьютерного моделирования промышленных аддитивных технологий. В качестве решателя Simufact Additive использует Marc, одну из старейших и надежных систем компьютерного инженерного анализа нелинейных процессов, основанную на методе конечных элементов. Marc уже несколько десятилетий широко используется как для инженерного анализа, так и непосредственно для моделирования технологических процессов и хорошо зарекомендовал себя во многих отраслях промышленности.

Даниэль Пузак, компания Dassault Systemes.

3D-печать была изобретена в 80-е годы прошлого века для более быстрого создания опытных образцов. В то время ее поддерживало множество узкофункциональных, преимущественно неструктурированных приложений, и истинные возможности этой технологии десятилетиями оставались не востребуемыми. С появлением хорошо контролируемых материалов и передовых программных процессов мы наблюдаем, как все шире распространяются гораздо более функциональные инженерные приложения, где применяются послойные методы производства. Многие из этих приложений предназначены для непосредственного изготовления деталей и инструментов, и мы называем такие процессы методами аддитивного производства.

Сегодня на рынке представлен широкий спектр поставщиков средств аддитивного производства – от крупных мировых игроков до небольших стартап-компаний. Каждая из этих компаний выпускает отличные от других системы, реализующие процессы экструзии полимеров и процессы формирования слоя металлического порошка. Мы даже рассматриваем в качестве элементов аддитивного производства некоторые из традиционных и более совершенных сварочных процессов.

Большинство современных технологий требует подробного анализа процессов, например профилей распределения температур и деформаций, чтобы лучше управлять эксплуатационной прочностью и надежностью. Компания Dassault Systemes предлагает полностью открытую и настраиваемую среду моделирования, позволяющую пользователям адаптировать методы анализа, информирующие о процессах.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”.

Аддитивные технологии вывели на большой рынок алгоритмы непараметрической оптимизации, или, как сейчас модно говорить, “бионического дизайна”. Данные алгоритмы нашли практическое применение именно благодаря аддитивному производству. Однако стало очевидно, что существующие инструменты CAD/CAM/CAE-систем не в состоянии обеспечить эффективную работу с подобного рода объектами. Тем не менее это не означает, что таких инструментов не существует. Спрос рождает пред-

ложение, и крупные разработчики САУ уже анонсируют обновления своих решений, подразумевающие проектирование под аддитивное производство.

Дмитрий Ошкин, ПАО “ОАК”. Текущий уровень развития систем автоматизированного проектирования позволяет применять их для целей аддитивного производства. Одно из новых направлений в развитии систем проектирования – это проектирование с использованием так называемой топологической оптимизации, когда на основе данных о нагружении производится расчет 3D-карты напряжений и на ее базе строится новый дизайн изделия с учетом рассчитанных напряжений. Это перспективное направление, которое сейчас внедряется практически во все системы автоматизированного проектирования, рассчитанные на использование аддитивных технологий. Рекламирывать конкретные решения не буду, как говорится, на вкус и цвет все фломастеры разные.

Денис Федосеев, ПАО “НПО “Сатурн”.

Как правило, промышленные системы автоматизированного проектирования плохо подходят для моделирования деталей сложной конструкции с развитой геометрией, например с ячеистыми структурами, содержащими десятки тысяч различных элементарных форм. В таких случаях из-за особенностей используемых технологий параметризации необходимы серьезные вычислительные ресурсы. Это существенно ограничивает широкое применение систем автоматизированного проектирования для моделирования композитных, градиентных, развитых бионических структур, формообразование которых возможно с применением аддитивных технологий. Решение этих специфических задач требует разработки соответствующих вычислительных методов для многоуровневого моделирования, обратного проектирования и оптимизации. Разработки систем такого рода активно ведутся.

Кирилл Виноградов, ПАО “НПО “Сатурн”.

Если имеется в виду некая единая CAD/CAM/CAE-система для включения ее в цикл проектирования деталей под аддитивное производство, то говорить о наличии такого интегрированного продукта пока преждевременно. В настоящее время существуют только отдельные изолированные решения для некоторых этапов цикла проектирования (топологическая оптимизация и пост-обработка ее результатов, анализ поддерживающих структур, моделирование непосредственно самого процесса 3D-печати).

Безусловно, более широко на рынке представлены программные решения для топологической оптимизации, так как они начали развиваться еще задолго до появления и широкого распространения аддитивных технологий. К наиболее популярным решениям можно отнести ПК Altair HyperWorks, TOSCA Structure, MSC Nastran.

Основываясь на опыте НПО “Сатурн” по использованию аддитивных технологий и проектированию деталей под аддитивное производство, можно выделить следующие основные требования к такой системе:

- ▶ преимущество формата данных с распространенными CAD-системами;
- ▶ наличие эффективного и устойчивого алгоритма топологической оптимизации, объединенного с

FEM-решателем, обладающим возможностью моделирования многих случаев сложного нагружения, с широким набором целевых функций и ограничений;

- ▶ возможность создания триангулированных моделей (формат .stl) для технологической проработки;
- ▶ возможность оптимизации поддерживающих структур и технологического моделирования процесса 3D-печати с возможностью оценки остаточных напряжений и дефектов при изготовлении.

Теоретически существуют два способа реализации подобной системы:

1. Интеграция отдельных программных решений на базе единой CAD/CAM/CAE/PDM-системы с учетом всех особенностей аддитивного производства.
2. Использование отдельных решений различных производителей. В данном случае компания получает преимущества специализированных расчетных пакетов, но вынуждена использовать "ручное управление" жизненным циклом.

– Традиционное производство, как известно, надежно обеспечивает воспроизводимость свойств и структуры материалов, из которых изготавливается изделие. При аддитивном производстве параметры системы 3D-печати задаются индивидуально, в результате чего наблюдаются отличия в геометрии и свойствах изготовленных на разных установках деталей, которые должны быть идентичными. Для решения проблемы соответствия требуемых характеристик изделия реальным (помимо мер по стандартизации АП-процессов, что дело неблизкого будущего), необходим, как очевидно, анализ их свойств и корректировка непосредственно в ходе изготовления, для чего в АП-установки должны быть введены соответствующие датчики и контроллеры. Следует ли ожидать в ближайшее время появления таких устройств для АП-процессов?

Денис Федосеев, ПАО "НПО "Сатурн". Безусловно, важнейшим направлением развития оборудования 3D-печати является интеграция методов автоматизированного контроля, позволяющих контролировать изделие непосредственно в ходе изготовления путем сопоставления его номинальных проектных характеристик с реальными и в случае необходимости предоставляющих возможность корректировать параметры процесса по средствам управляющей обратной связи, способной компенсировать отклонения и справиться с другими проблемами, которые сложно предсказать заранее. Все ведущие разработчики оборудования АП ведут работы по реализации этой концепции, определенные возможности уже заложены в управляющее программное обеспечение новейшего оборудования.

Сергей Бутяга, компания РТС. Дело в том, что, к сожалению, наше традиционное производство не

обеспечивает даже необходимого уровня производительности оборудования. У нас есть обрабатывающие центры, есть софт и зачастую отсутствует автоматизация по производственным этапам. В результате производство не может работать 24 часа в сутки и 7 дней в неделю (горизонтальный обрабатывающий центр работает 8 часов, а 16 часов стоит, дожидаясь оператора). Также нет особого смысла во внедрении лазерного спекания, если к традиционному обрабатываемому центру заготовки до сих пор подносят вручную. Для обеспечения нужных характеристик по точности и надежности изделий в масштабе массового производства (а только в этом масштабе оно будет рентабельным) нужен системный подход к организации существующего производства и к внедрению в него новых технологий.

Эдуард Князев, компания MSC Software. Модуль Simufact Additive позволяет производить проработку и оптимизацию технологического АП-процесса. Этот пакет дает возможность вычислять деформации в детали, а также получать данные о состоянии детали после термической обработки, удаления опорной пластины и поддерживающей структуры. Таким образом, используя компьютерное моделирование, еще до начала собственно процесса изготовления изделия можно подобрать оптимальное направление печати и оптимизировать форму поддерживающей структуры. Соответственно, мы можем минимизировать деформации и остаточные напряжения в детали и уменьшить или вообще избежать искажения ее формы, что позволит производить детали с требуемой точностью с первой же попытки. Дальнейшее развитие расчетных технологий в Simufact Additive позволит более углубленно моделировать АП-процессы, что даст возможность прогнозировать механические свойства материала после печати, его плотность, наличие пор, шероховатость поверхности, непровар и другие особенности.

Алексей Чехович, компания CSD. Сегодня конструктор, выбирая посадку "корпус-подшипник" и зная нагрузочные характеристики сопряжения, всегда может открыть ГОСТ и выбрать допуски на это соединение. В сфере аддитивных технологий таких возможностей подбора параметров для получения гарантированных результатов печати на любом 3D-принтере пока нет. На сегодняшний день ни один производитель 3D-принтеров не обладает математической моделью всего процесса изготовления изделия даже на 50%. Есть достоверно определенные эмпирическим путем технологические окна, в пределах которых производитель может гарантировать заявленные характеристики полученных изделий. Кроме того, индивидуальные настройки оборудования под материалы и задачи являются коммерческой тайной каждого производителя. Поэтому пока несколько крупнейших компаний не делают шаги к консолидации усилий по решению данной проблемы или пока не будут введены соответствующие стандарты на государственном уровне, в ближайшее время не следует ожидать появления общедоступных баз данных по описанию необходимых параметров печати, а также датчиков и контроллеров слежения за процессом на RP-установках (Rapid Prototyping).

Даниэль Пузак, компания Dassault Systemes.

Прогнозирование деформации деталей и остаточных напряжений – одна из важнейших задач моделирования при помощи аддитивных технологий. Для обеспечения точности этих операций требуется полное понимание свойств материала, поскольку он подвергается колоссальным температурным нагрузкам. Понимание физических процессов на более низком уровне является важным условием для моделирования деталей методом конечных элементов. Атомистические или неэмпирические, а также фазово-пространственные типы вычислений можно производить при помощи инструментов под брендом BIOVIA, которые используются для калибровки сплошных моделей и управления тепловым и механическим моделированием с применением методов гомогенизации. Используя технологию SIMULIA, можно выполнять моделирование на уровне детали, то есть можно прогнозировать деформации и остаточные напряжения, а также создавать максимально детализированную модель, позволяющую понять результаты термического воздействия на разные участки изготавливаемой детали по мере того как лазер расплавляет порошок.

Таким образом, мы можем использовать технологии BIOVIA, чтобы посмотреть на механику аддитивных процессов на атомном и молекулярном уровнях и отслеживать трансформацию материала в различных линейных направлениях для точного прогнозирования деформаций детали.

Уникальной является способность аддитивной технологии создавать полые конструкции с помощью мелких ячеек, известных как сплошные (ячеистые) структуры. Наиболее часто используемые сплошные структуры конструкции – это сетчатая, сотовая, прямолинейная и треугольная, а также решетчатые 3D-структуры. Научно-исследовательское подразделение SIMULIA разработало плагин RVE для многомасштабной гомогенизации материалов. Плагин предоставляет множество функций, включая линейное и нелинейное тепловое и механическое изменение сетки для материала, периодические и неперидические граничные условия, постобработку. Мы можем использовать его для сплошной гомогенизации, чтобы изучать соотношение пустот и сплошного материала, создавать тепловые карты и рассчитывать конечную эффективность конструкции в реальных условиях эксплуатации. На основе свойств гомогенизированного материала при разной плотности из многомасштабного плагина RVE можно интерполировать поведение материала и оптимизировать топологию.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”.

Считаю, что решение проблемы сводится к стандартизации и калибровке аддитивного оборудования. Данные процедуры внедрены в традиционном производстве, и имеется огромный опыт применения данных методов контроля. Аддитивные установки отличаются высокой степенью автоматизации, и внедрение в них систем калибровки будет происходить намного быстрее.

Дмитрий Ошкин, ПАО “ОАК”. С моей точки зрения, промышленные машины для аддитивного производства уже давно достигли необходимой точности изготовления изделий, и процессы контроля точности из-

готовления решены на уровне внутреннего программного обеспечения аддитивного оборудования. Я бы сказал, что если та или иная машина имеет проблемы с точностью и повторяемостью изготовления деталей, то ее просто нельзя серьезно рассматривать для применения в промышленном производстве.

– Как грамотно интегрировать АП-процессы в единую технологическую цепочку изготовления изделий?

Даниэль Пузак, компания Dassault Systemes.

Технология изготовления изделий с использованием методов аддитивного производства включает следующие этапы:

1. **Виртуальное проектирование материала.** Специалист по материаловедению исследует новые материалы виртуально и определяет их пригодность для аддитивного производства.
2. **Проектирование инновационных продуктов.** Инженер фиксирует функциональные требования, чтобы создать оптимизированную концепцию, а затем осуществляет моделирование органической формы.
3. **Технологическая подготовка производства.** Инженер-технолог программирует АП-машину и определяет производственные планы в соответствии с проектными требованиями и ожидаемым качеством.
4. **Запуск производства.** Инженер-технолог определяет доступные объемы производства на основании наличия и производительности машин и обеспечивает оптимизацию производства (эффективность использования машины).
5. **Поиск лучших поставщиков услуг печати.** Инженер-технолог соединяется с Центром аддитивного производства, чтобы найти лучшего поставщика услуг для печати конкретной детали.

Эдуард Князев, компания MSC Software.

Компьютерное моделирование промышленных аддитивных технологий хорошо интегрируется в общую линейку технологий MSC Software. Процесс проектирования может начинаться с топологической оптимизации в MSC Nastran. В результате можно получить оптимальную с точки зрения прочности форму детали. При этом нет необходимости учитывать ограничения, накладываемые традиционными способами производства детали. Далее в Simufact Additive моделируется сам процесс 3D-печати металлической детали, затем идет моделирование горячего изостатического прессования, после чего моделируется термообработка, необходимая для снятия внутренних напряжений. Заключительным этапом в Simufact Additive является моделирование процессов обрезки и удаления опорной пластины и поддерживающей структуры. После этого в пакете Marc можно производить анализ прочности с учетом остаточных деформаций в детали, и в MSC Fatigue можно спрогнозировать долговечность изделия.

Сергей Бутяга, компания РТС. Прежде всего нужно обеспечить передачу “напечатанных деталей” на последующие этапы обработки, производимой с применением традиционных технологий. Не стоит забывать, что главной целью производства изделия остается его

полная качественная сборка, а не печать отдельных деталей или узлов. Поэтому все отличия в геометрии на разных установках должны быть обозначены в цифровой модели, которая уходит в производство из конструкторского отдела. Должны быть созданы так называемые семантические связи между технологическими обозначениями в файлах для печати и производства, то есть в самой модели должны указываться те операции, которые только предстоит сделать при отрезке ее от “основы” и при сборке с указанной точностью на поверхностях.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”. На данном этапе развития аддитивных технологий в России, при отсутствии нормативных баз и ГОСТов, для грамотного внедрения необходимо проведение НИОКР индивидуально под каждую деталь, причем в условиях опытного производства. Это позволит основному производству внедрить готовый техпроцесс с необходимым набором обоснований, а не заниматься исследованиями в условиях жестких производственных графиков.

Дмитрий Ошкин, ПАО “ОАК”. По сути, аддитивное производство ничем не отличается от традиционного (просто новая технология, основанная на ином принципе), и его интеграция в техпроцессы – это стандартная задача создания технологического цикла производства, доступная технологам предприятий.

Денис Федосеев, ПАО “НПО “Сатурн”. Специалистам ПАО “НПО Сатурн” такая интеграция удалась, приезжайте, все покажем. ☺

– В каких направлениях будут развиваться AP-технологии и предстоит ли им заменить собою традиционные способы промышленного производства?

Денис Федосеев, ПАО “НПО “Сатурн”. Заменить – нет, а дополнить уникальными возможностями существующие, традиционные способы промышленного производства – безусловно, что, собственно, сейчас и происходит.

Совершенствование же технологических процессов промышленной 3D-печати будет происходить в направлении увеличения скорости, увеличения рабочих зон, повышения точности изготовления изделий, увеличения массовости производства и т.д.

Эдуард Князев, компания MSC Software. Поскольку в обозримом будущем наиболее эффективными областями использования AP-технологий будут единичное или мелкосерийное производство деталей небольшого размера, а также изготовление деталей сложной формы, о чем здесь уже говорилось, именно в этих областях AP-технологии вполне могут заменить традиционные способы промышленного производства, обеспечивая меньшую стоимость единицы продукции.

Рустам Фасхутдинов, АО “Авиадвигатель”. AP-технологии займут свою нишу в производственной цепочке, не вытесняя существующие технологии, а взяв на себя проблемные технологиче-

ские процессы. Потенциал развития решений для аддитивного производства вижу в повышении качества поверхности заготовки при увеличении скорости синтеза и максимальных размеров изделий, также рынок скоро начнет требовать узкоспециализированного оборудования, заточенного под производство деталей конкретного типа.

Дмитрий Ошкин, ПАО “ОАК”. AP-технологии никогда не вытеснят традиционное производство, просто они станут его частью и будут применяться совместно. А основным критерием их применения, как и любой другой технологии, будет экономическая целесообразность.

Сергей Бутяга, компания РТС. Ответ на этот вопрос может дать только время. На самом деле здесь все как в бизнесе: вас не заметят и не признают успешной компанией, пока вы этого успеха не добьетесь. Если начать серьезно работать в этом направлении, то мы приобретем нужный опыт и нужные нам отечественные технологии. При определенной степени настойчивости мы сможем добиться нужного экономического эффекта, что является определяющим для организации эффективного промышленного производства в России.

Как очевидно из состоявшегося обсуждения, на сегодняшний день наша страна пока еще слабо вовлечена в процесс активного внедрения аддитивных технологий в промышленности, происходящий во всем мире. Тем не менее, у промышленных компаний есть не только понимание преимуществ AP-технологий, но и практический интерес к их использованию, когда сроки и гибкость процессов разработки новой продукции имеют принципиальное значение. Отрадно то, что наибольшую заинтересованность в использовании аддитивных процессов с момента их появления проявляет такая наукоемкая и высокотехнологичная область, как авиационно-космическая отрасль, во многом обеспечивающая технологическую независимость и безопасность страны.

Кроме того, достижения предприятий и организаций, целенаправленно занимающихся разработкой и внедрением аддитивных технологий в процессы промышленного производства, позволяют надеяться, что у отечественной науки и промышленности есть все предпосылки для того, чтобы в обозримой перспективе обеспечить конкурентоспособность и востребованность отечественной продукции. Подтверждением тому служит в частности успешная деятельность Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ), где создано аддитивное производство полного цикла и специалисты которого уже начали изготавливать по аддитивной технологии с применением отечественных металлопорошковых композиций детали авиационной техники.

Круглый стол провела
Елена Васильева