

ПУБЛИЧНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ДОКЛАД ПО РАЗВИТИЮ НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ОКТАБРЬ 2014



На заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России 16 сентября 2014 г. было принято решение о разработке проекта национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» с участием заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, институтов развития, участников соответствующих технологических платформ и Экспертного совета при Правительстве Российской Федерации. В проект Национальной инициативы должны быть включены разработки средств автоматизации и роботизации, отечественного программного обеспечения в сфере сопровождения жизненного цикла создания промышленных продуктов, аддитивных технологий, иных направлений по развитию новых промышленных технологий и обеспечения их материалами, а также совершенствования регуляторной среды для указанных видов деятельности.

В качестве первого шага при подготовке проекта Национальной инициативы Сколковским институтом науки и технологии (Сколтех) подготовлен публичный аналитический доклад по новым производственным технологиям. Доклад раскрывает понятие перспективных производственных технологий, описывая изменение облика промышленного производства, процессов производства, с обоснованием того, что новые производственные технологии – это не только новые направления исследований и технологические области, но и изменение организации процессов производства.

МАТЕРИАЛ РАССЫЛАЕТСЯ ДЛЯ ОЗНАКОМЛЕНИЯ
К ОБСУЖДЕНИЮ 22 ОКТЯБРЯ 2014 ГОДА В СКОЛКОВО



Содержание

1.	Введение	4
1.1.	Цели и задачи доклада	4
1.2.	Целевая аудитория доклада.....	4
1.3.	Определение понятия перспективных производственных технологий, структура технологий и мировые рынки ключевых технологий	5
1.4.	Изменение облика обрабатывающей промышленности в мире	12
1.5.	Уровень готовности российской промышленности к разработке и внедрению новых производственных технологий	15
1.6.	Глобальные и национальные вызовы развитию новых производственных технологий ...	17
2.	Ключевые технологии, формирующие облик перспективного производства в мире и место России20	
2.1	Перспективные технологии организации и управления производством	20
2.1.1	Определения и сокращения.....	20
2.1.2	Мотивация	21
2.1.3	Современные направления и результаты развития технологий организации и управления производством	22
2.1.4	Новые тренды развития технологий организации и управления производством.....	26
2.1.5	Обобщение и анализ.....	38
2.1.6	Оценки перспектив для России.....	46
2.1.7	Список литературы	52
2.2	Компьютерные технологии для моделирования и производства изделий	55
2.2.1	Определения и сокращения.....	55
2.2.2	Мотивация	55
2.2.3	Основные технологии CAD и CAE	57
2.2.4	Ведущие международные производители CAD и CAE - систем; тенденции развития	61
2.2.5	Российские производители CAD и CAE – систем; тенденции развития.....	73
2.2.6	Обобщение и анализ.....	76
2.2.7	Оценки перспектив для России.....	82
2.2.8	Список литературы	84
2.3	Промышленная и сервисная робототехника	85
2.3.1	Определения и типология робототехники	85
2.3.2	Экономические и социальные факторы развития робототехники	86
2.3.3	Структура отрасли промышленной и сервисной робототехники	88
2.3.4	Текущий статус технологий промышленной и сервисной робототехники за рубежом	94

2.3.5 Перспективные направления и мировые центры разработок в области промышленной и сервисной робототехники	100
2.3.6 Состояние российской промышленной и сервисной робототехники	103
2.3.7 Список литературы	110
2.4 Аддитивное производство.....	111
2.4.1 Основные определения и рынки аддитивного производства.....	111
2.4.2 Технологии и оборудование аддитивного производства	114
2.4.3 Текущие и перспективные применения аддитивного производства.....	123
2.4.4 Препятствия на пути распространения технологий аддитивного производства	129
2.4.5 Направления исследований	133
2.4.6 Аддитивное производство в России: текущее состояние и перспективы.....	141
2.4.7 Список литературы	145
2.5 Новые материалы.....	148
2.5.1. Спроектированные материалы и производство	148
2.5.2. Металлургия для авиационной и автомобильной промышленности, порошки для аддитивного производства.....	173
2.5.3 Материалы для средств автономного питания и накопления электроэнергии	180
2.5.4 Высокоэнергетические материалы.....	191
2.5.5 Порошковая металлургия и новые сплавы	193
2.5.6 Список литературы	196
3. Предложения по адресным мерам государственной политики по развитию новых производственных технологий	199

1. Введение

1.1. Цели и задачи доклада

Целью Публичного аналитического доклада по новым производственным технологиям (НПТ) является анализ ситуации в России и мире, формирование комплексного видения перспектив развития данных технологий в России и разработка предложений по мерам их государственной поддержки.

Задачи Доклада состоят в следующем:

- определение понятия, структуры и содержания НПТ;
- анализ состояния и основных направлений развития отдельных сегментов НПТ в мире и России;
- оценка мирового опыта использования различных мер стимулирования развития НПТ на государственном уровне;
- анализ экономических условий, влияющих на разработку НПТ в России и их использование в российской промышленности;
- анализ эффективности и достаточности существующих мер государственной политики, релевантных для поддержки развития НПТ;
- разработка предложений по мерам адресной государственной поддержки развития НПТ в России.

1.2. Целевая аудитория доклада

Целевая аудитория Доклада может включать:

- федеральные и региональные ведомства, ответственные за формирование мер государственной политики в области развития науки, технологий, инноваций, промышленности, малого и среднего бизнеса и т.д.
- Институты развития, осуществляющие целевую поддержку инновационной деятельности и стимулирующих технологическое развитие;

- представители компаний-потребителей и компаний-производителей продукции НПТ;
- исследовательские организации, работающие по тематике НПТ;
- высшие учебные заведения, занимающиеся подготовкой кадров по тематическим направлениям новых производственных технологий.

1.3. Определение понятия перспективных производственных технологий, структура технологий и мировые рынки ключевых технологий

Выдвижение НПТ (как единого комплекса технологий) в качестве одного из ключевых технологических приоритетов в ряде развитых стран произошло в 2010-2012 гг. и способствовало появлению новых исследований, изучающих причины, содержание и перспективы развития новых технологий. Тем не менее, до настоящего времени не выработано общепринятого определения НПТ¹.

Наиболее широко используется понятие «передового производства» (advanced manufacturing), введенное Национальной ассоциации перспективных производственных технологий США (National Association of Advanced Manufacturing, NACFAM):

Передовое производство - это производство, в котором широко используются компьютерные, высокоточные и информационные компоненты, интегрированные с высокопроизводительной рабочей силой, которое создает систему, сочетающую в себе преимущества массового производства и, в то же время, гибко настроенную на необходимый в данный момент объем выпуска, и обладающую высокой степенью кастомизации с целью быстрого реагирования на потребности клиентов.

Помимо этого определения используются и другие. В том числе можно привести следующие интерпретации понятия передового производства:

Передовое производство – это совокупность усилий, каждое из которых основывается на глубоком внедрении информационных технологий и передового программного обеспечения, автоматизации производственных процессов, высокоточных датчиков и сетей и/или использует новые материалы и те возможности, которые открываются

¹ Дежина И., Пономарев А. (2014) Перспективные производственные технологии: новые акценты в развитии промышленности // Форсайт, №2.

благодаря научным достижениям в области физики, биологии, химии (Совет консультантов президента США по науке и технологиям – PCAST, 2011)².

Передовое производство – это производство, основанное на улучшенных существующих и/или специально создаваемых новых материалах, изделиях и процессах, посредством внедрения достижений науки, техники, высокоточных и информационных технологий, интегрированных с рабочей силой высокой производительности, инновационным бизнесом или организационными моделями (Институт анализа военных проблем США - Institute for Defense Analyses)³.

В рамках данного исследования предлагается использовать следующее определение:

Новые производственные технологии – это комплекс процессов проектирования и изготовления на современном технологическом уровне кастомизированных (индивидуализированных) материальных объектов (товаров) различной сложности, стоимость которых сопоставима со стоимостью товаров массового производства⁴.

В обобщенном виде отличие массового производства от кастомизированного можно представить следующим образом (Таблица 1).

Таблица 1 - Отличие массового производства от кастомизированного

Параметр	Массовое производство	Индивидуализированное производство
Источник конкурентных преимуществ	Низкая цена, большие объемы и разнообразие	Кастомизация для конечного пользователя
Цепочки добавленной стоимости	Последовательная линейная передача между распределенными производителями с жестко закрепленными функциями и ответственностью	Нелинейное локализованное сотрудничество с неопределенными ролями и ответственностью
Дистрибуция	Высокие транспортные расходы	Прямое взаимодействие между локальным потребителем / клиентом и производителем
Экономическая модель	Сочетание фиксированных и	Практически все цены становятся

² Report to the President on ensuring American leadership in advanced manufacturing. Executive Office of the President. President's Council of Advisors on Science and Technology. June 2011, p.9 <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-advanced-manufacturing-june2011.pdf>

³ S. Shipp S. S. (2012) Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing.

⁴ Дежина И., Пономарев А. (2014) Перспективные производственные технологии: новые акценты в развитии промышленности // Форсайт, №2.

	переменных цен	переменными
Дизайн	Упрощенный дизайн, обусловленный производственными ограничениями	Комплексный и уникальный дизайн, позволяющий кастомизацию
Конкуренты	Хорошо известные конкуренты	Постоянно изменяющийся состав конкурентов

Источник: Petrick I., Simpson T. 3D Printing Disrupts Manufacturing // Research-Technology Management, November-December 2013. P.13.

Массовое производство и кастомизированное будут сосуществовать, но отдельно – иными словами, эти схемы будут использоваться для производства разных продуктов.

Появление и распространение индивидуализированного производства влечет за собой, по мнению Petrick et al⁵, пять последствий:

1. станет меньше барьеров в парадигме дизайн-создание-доставка;
2. дизайн и производство будут теснее связаны через экспериментирование с новой продукцией;
3. конкурентное преимущество будет как в дизайне, так и производстве, и новый вызов состоит в том, как совместить интересы производителей, заинтересованных в простом дизайне, с потребителями, которым нужны кастомизированные, сложные продукты;
4. физическое расстояние между поставщиками, производителями и потребителями будет иметь большое значение, и локализация становится не столько возможной, сколько желательной;
5. изменяются горизонты планирования – на смену долгосрочному планированию приходит планирование в режиме реального времени.

Нет устоявшейся точки зрения и на то, какие виды технологий объединяет синтетическое понятие НПТ. В рамках Доклада используется следующая сегментация НПТ (Таблица 2).

Таблица 2 - Основные сегменты и примеры технологий, входящих в НПТ

Сегменты НПТ		Традиционные техника и технологии (примеры)		Новые техника и технологии (примеры)
ИТ-системы, обеспечивающие поддержку ЖЦ	Многомерное моделирование сложных изделий	CAD/CAE/CAM, PDM	→	CAx для аддитивных технологий,

⁵ Petrick I., Simpson T. 3D Printing Disrupts Manufacturing // Research-Technology Management, November-December 2013. P.15-16.

продукции	Интеллектуальные системы управления производством			облачные технологии, M2M
Оборудование и технологии для формообразования изделий		станкостроение, оборудование для обработки пластмасс и проч.	→	аддитивное производство, лазерная обработка
Оборудование и технологии для автоматизации производственных процессов		реле, переключатели, сенсоры, силовая электроника	→	промышленная робототехника, сенсорные системы
Передовые материалы, используемые для новых производственных процессов		металлы, пластик	→	композитные материалы, металлы, керамика и др.

Источник: составлено авторами

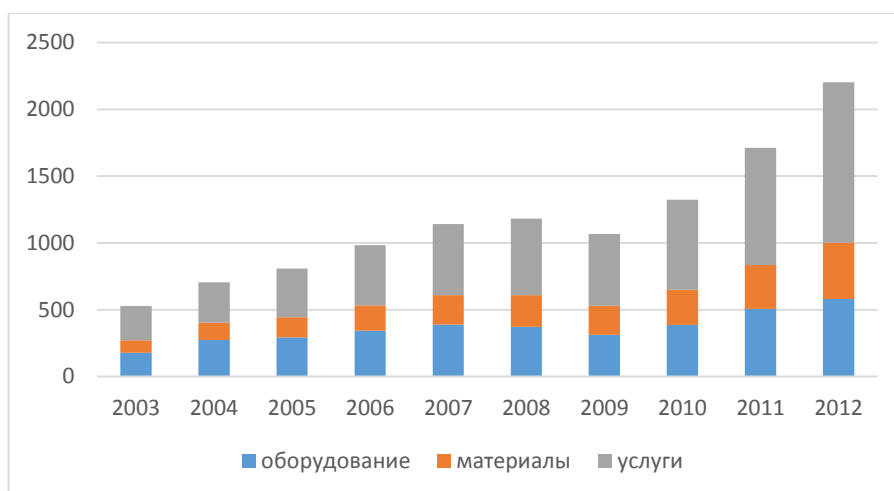
Мировые рынки, связанные с развитием НПТ, существенно различаются как по масштабам, так и по темпам роста. Так, рынок аддитивных технологий характеризуется достаточно малыми объемами (2,2 млрд. долл.), но быстрыми темпами прироста (более 27%), в то время как рынок программных продуктов для разработки предметов производства по объемам составляет около 22 млрд. долл., но в последние годы демонстрирует средние темпы прироста на уровне 6,7%. Кратко обзор мировых рынков НПТ приводится ниже.

Аддитивные технологии

Рынок аддитивных технологий в мире в 2012 г. оценивался в 2,2 млрд. долл., из которых основной объем выручки - 54%, приходился на услуги, 26% - на оборудование, 19% - на материалы (см. **Error! Reference source not found.**). Среднегодовой темп прироста рынка за 2010-2012 гг. составил более 27%.

На рынке оборудования взрывной рост характерен для персональных 3D-принтеров, которые в 2008-2011 гг. показывали трехзначные темпы роста. Продажи промышленных 3D-принтеров также растут, хотя и не столь быстрыми темпами.

На рынке материалов в 2012 г. более половины рынков занимают продажи фотополимеров, еще почти четверть рынка – полимеры для лазерного спекания. Доля металлов в 2012 г. составляла только около 6% от продаж материалов для 3D-печати в мире. Рисунок 1 - Динамика и структура рынка аддитивных технологий в мире



Источник: рассчитано авторами на основе Wohlers Associates (2013) Wohlers Report 2013. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report, p.19, 122-125.

Согласно прогнозам Wohlers Associates к 2021 г. мировой рынок 3D-печати может достигнуть размера в 10,8 млрд. долл., что соответствует среднегодовому темпу роста в 2013-2021 гг. в 19,3%.

В обзоре компаний-производителей промышленных 3D-принтеров, приведенном в Wohlers Report 2013, российские компании не отражены. В то же время по данным Wohlers Associates на Россию приходится около 1,9% от общего количества 3D-принтеров, установленных за период 1988-2012 гг.⁶

Робототехника

В 2012 г. объем мирового рынка промышленной робототехники оценивался в 8,7 млрд. долл. В то же время, если учитывать смежные рынки (рынки ПО для робототехники, периферийное оборудование и др.), то объем мирового рынка робототехнических систем в 2012 г. составлял порядка 26 млрд. долл.⁷

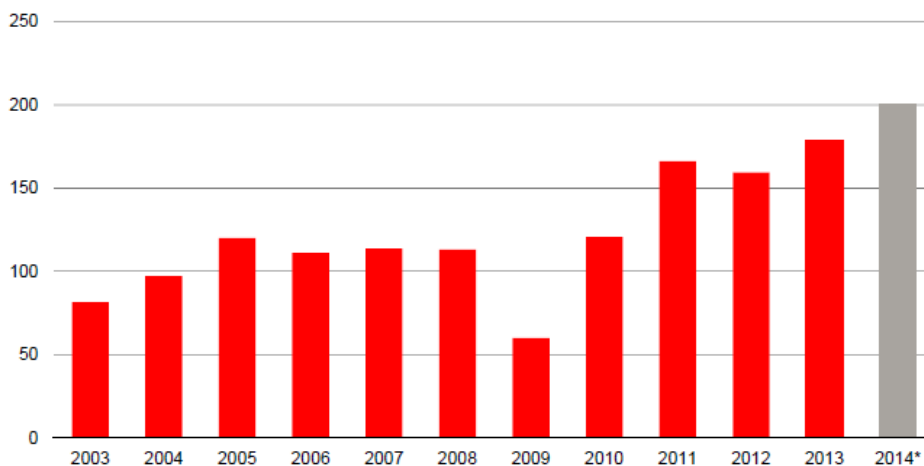
Динамика производства промышленных роботов в мире на протяжении последнего десятилетия была неустойчивой – во второй половине 2000-х гг. рост практически отсутствовал, в первые посткризисные годы на рынке наблюдался быстрый рост (с небольшой корректировкой в 2012 г.), в 2013 г. и, по прогнозам, в 2014 г. рынок промышленной робототехники продолжит быстрый рост (см.Рисунок 2).

⁶ Wohlers Associates (2013) Wohlers Report 2013. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report, p.21, 134.

⁷ <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>

С точки зрения отраслевой структуры потребления промышленных роботов на первом месте с большим отрывом идет автомобилестроительная отрасль, за ней – отрасль по производству электроники/электротехники.

Рисунок 2 - Динамика производства промышленных роботов в мире (тыс. штук)



* - прогноз

Источник: IFR (2014) Outlook on World Robotics

Согласно оценкам McKinsey к 2025 г. 15-25% рабочих мест в промышленности и сельском хозяйстве в развитых странах могут быть экономически эффективно замещены роботами⁸. По оценкам BCG мировой рынок промышленных роботов может достичь к 2025 г. 24,4 млрд. долл.⁹, что соответствует среднегодовому темпу прироста рынка примерно в 8,3%.

Композитные материалы

Мировой рынок композитных материалов в 2011 г. оценивался примерно в 19,6 млрд. долл., причем рынок конечной продукции из композитных материалов оценивался в 55,6 млрд. долл.¹⁰

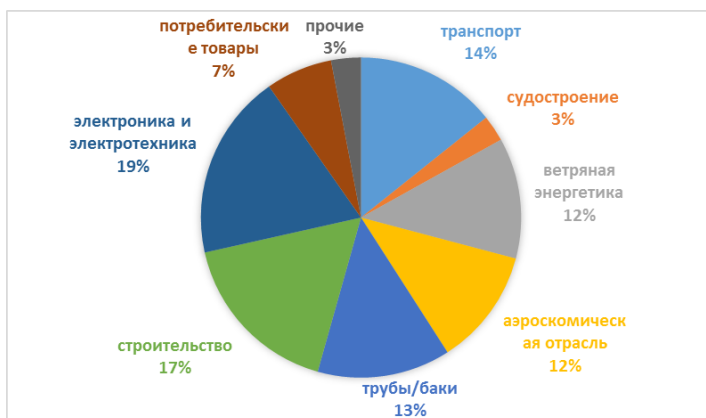
В 2011 г. основной объем использования композитов приходится на такие отрасли как электроника и электротехника (19%), строительство (17%), транспорт (14%) (см. Рисунок 3).

Рисунок 3 - Отраслевая структура мирового рынка композитных материалов

⁸ McKinsey Global Institute (2013) Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy, p. 74.

⁹ Sander A., Wolfgang M. (2014) The rise of robotics (https://www.bcgperspectives.com/Images/The_Rise_of_Robotics_Aug_2014_tcm80-168791.pdf)

¹⁰ Kazmierski C. (2012) Growth Opportunities in Global Composites Industry, 2012-2017.



Источник: построено на основе Kazmierski C. (2012) Growth Opportunities in Global Composites Industry, 2012-2017.

В то же время если анализировать структуру выручки по наиболее передовым композитам – на основе углеводородных волокон, получается, что около 40% выручки приходится на аэрокосмическую отрасль, 13% - на ветроэнергетику, а на автомобилестроение – только 3%¹¹.

По прогнозам мировой рынок композитных материалов вырастет к 2017 г. до 29,9 млрд. долл., показав среднегодовые темпы роста в 7%¹².

Рынок программных продуктов для разработки предметов производства

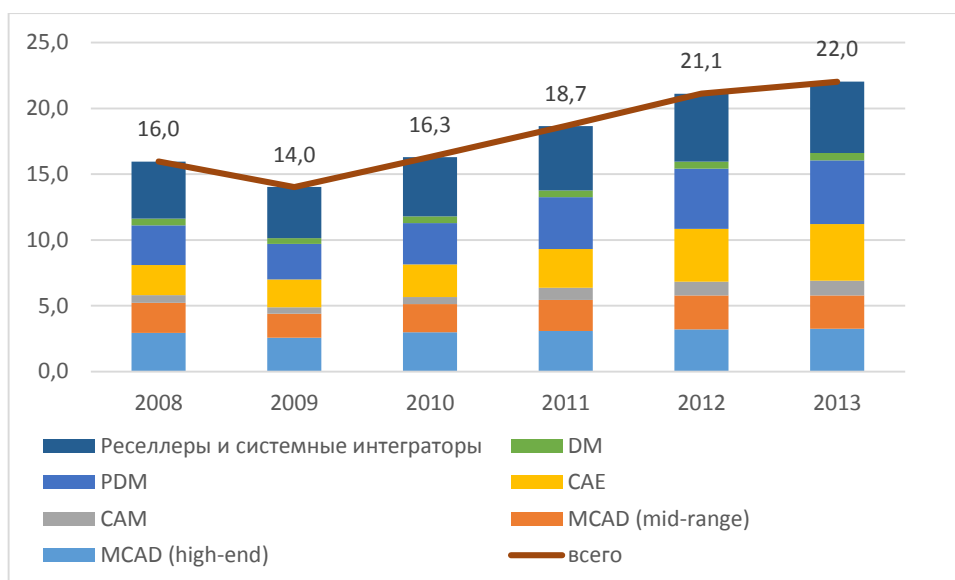
Мировой рынок программных продуктов для разработки предметов производства (в структуре, представленной компанией CIMdata)¹³ оценивался в 2013 г. приблизительно в 22 млрд. долл. Основная часть рынка приходилась на различные инженерные ПО (CAD/CAM/CAE). Наиболее быстро росли CAM, CAE и PDM сегменты рынка PLM. Несмотря на то, что рынок PLM в 2008-2013 гг. демонстрировал средние темпы прироста – 6,7%, темпы приростов в сегментах CAM и CAE были существенно выше - 13-14% (см. Рисунок 4).

Рисунок 4 - Динамика и структура мирового рынка программных продуктов для разработки предметов производства (млрд. долл.)

¹¹ Jahn B., Witten E. (2013) Composites Market Report 2013. Market development, trends, challenges and opportunities, p. 9. (http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/13/09/17/ccev-avk-marktbericht_2013-final-englisch-bj.pdf)

¹² Kazmierski C. (2012) Growth Opportunities in Global Composites Industry, 2012-2017

¹³ В данную категорию не входят системы электротехнического и электронного проектирования, системы для архитектурного и строительного проектирования, специализированные инструменты и др. (http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE_market_n72_pXX.pdf)



Источник: на основе серии обзоров мирового рынка CAE-технологий Павлова С. за 2011-2013 гг. на сайте <http://www.cadcamcae.lv> по данным CIMdata (структура за 2010 г. – рассчитана авторами).

По прогнозам CIMdata общий рынок к 2017 г. превысит 50 млрд. долл., а среднегодовые темпы роста составят 8,7%¹⁴.

1.4. Изменение облика обрабатывающей промышленности в мире

Изменение облика обрабатывающей промышленности происходит на трех основных взаимосвязанных уровнях:

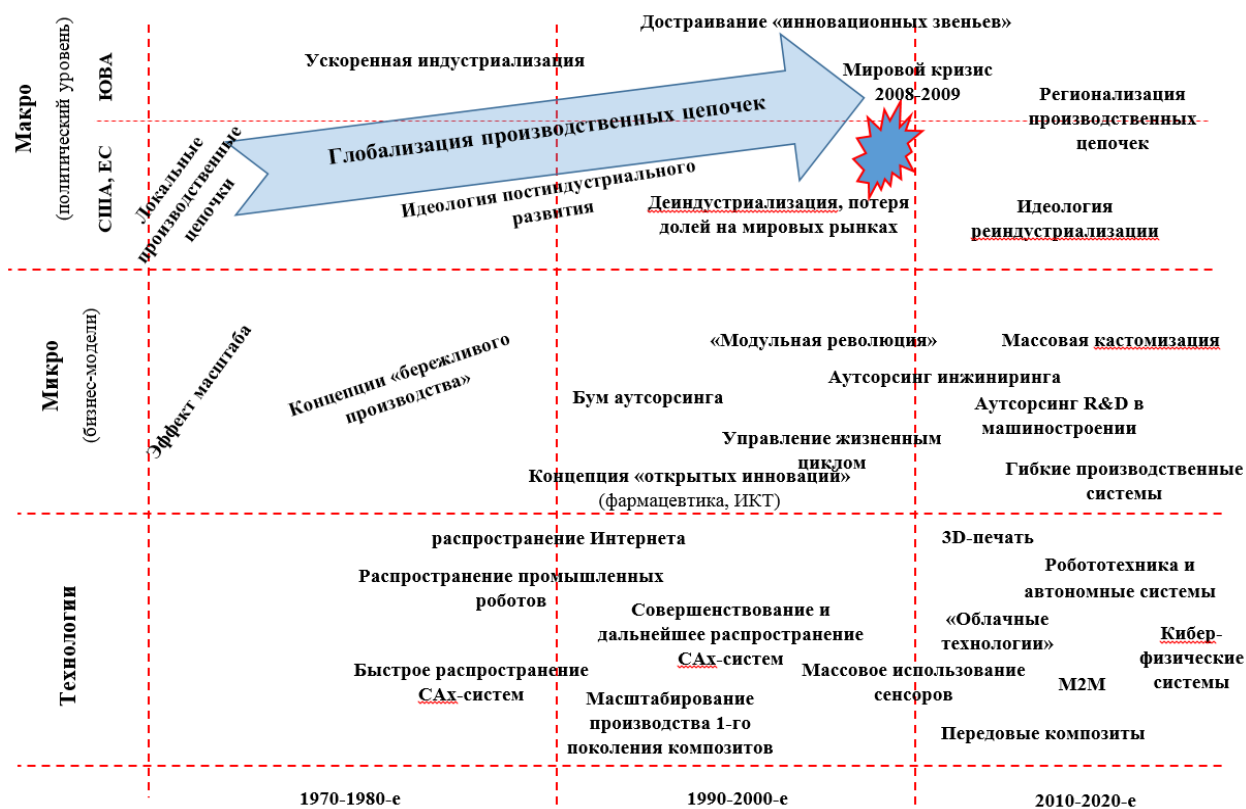
- на макроуровне (глобализация, регионализация, локализация производственных цепочек);
- на микроуровне (изменение бизнес-моделей: опора на эффект масштаба, «бережливое» производство, модель жизненного цикла изделия, кастомизация продукции и проч.);
- на уровне технологий (автоматизация и роботизация производства, использование новых материалов и проч.).

Развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) параллельно с процессами глобализации производственных цепочек в 1970-2000-х гг. существенно изменили облик обрабатывающей промышленности. Началось формирование

¹⁴ <http://www.design-engineering.com/cad-cam/cimdata-releases-plm-market-forecast-report-design-eng-112522>

распределенных производственных цепочек сложной конфигурации, ориентированных на «бережливое» производство, использование дешевых ресурсов по всему миру и выполнение жестких стандартов качества (см.Рисунок 5).

Рисунок 5 - Эволюция облика обрабатывающей промышленности



Источник: составлено на основе Княгинин В.Н. (2011) Базовая гипотеза промышленного форсайта (http://www.csr-nw.ru/upload/file_content_343.pdf)

Вследствие процесса глобализации происходил перенос из развитых стран в развивающиеся производственных мощностей, технологий, компетенций и определенного слоя технологических компаний, занимавшихся обслуживанием непосредственно производства.

Мировой экономический кризис 2008-2009 гг. резко обострил сформировавшиеся в предыдущие десятилетия противоречия, связанные с произошедшим переформатированием обрабатывающей промышленности, в рамках которого основные производственные мощности оказались сконцентрированы в развивающихся странах (прежде всего в странах Юго-Восточной Азии, в частности – в Китае), а технологии, ключевые компетенции и, соответственно, основная часть прибыли – в развитых странах. Постепенно компании новых индустриальных стран стали вытеснять с рынков

традиционных лидеров¹⁵, и как следствие, в начале 2010-х гг. в США и ЕС на первый план вышла идея о необходимости реиндустриализации национальных экономик на основе новых производственных технологий, с целью повышения их конкурентоспособности.

Мотивации стран к развитию перспективных производственных технологий тем не менее разные. Для США это необходимость укреплять лидерские позиции, понимание того, что политика вывода производств за пределы страны не оправдала себя и могут быть потеряны важные компетенции. Поэтому для США важное направление действий - это рещоризация или возврат производственных мощностей в страну, размещение их вблизи центров НИОКР.

Германия уделяет серьезное внимание перестройке самой системы производства, в частности развитию кибер-физических систем. Великобритания строит катаapult-центры, ориентируясь на разработку новых производственных процессов. Китай собирается развивать новую индустрию для того, чтобы в большей мере опираться на собственные силы.

Скорость разработки и инициирования новых мер государственной политики очень разная. Так, на уровне ЕС наряду с тем, что действует несколько платформ, направленных на развитие промышленных технологий, общие подходы только разрабатываются. Так, только в конце 2013 г. Дойче Банк опубликовал доклад «Реиндустриализация Европы», где рассматриваются цели и меры по развитию новых производственных технологий.

В свою очередь в США государственная политика реализуется очень динамично. Иллюстрацией могут служить опросы Boston Consulting Group, проведенные в 2012 г. и в 2013 г. Они показали, что доля американских компаний, вернувших производство из Китая обратно в США или планирующих сделать это в ближайшие два года, возросла с 37% до 54%.

В то же время массовая кастомизация продукции предполагает глубокие изменения, связанные как с ускорением и удешевлением разработки новых моделей и типов продукции, так и организацией гибких производственных систем, оперативно реагирующих на изменение рыночных потребностей. Поэтому ускорение и удешевление разработки новых моделей и типов продукции в настоящее время базируется на передовых технологиях (3D-печать, технологии параллельного удаленного проектирования объектов, в том числе с использованием облачных технологий, и др.) и на передовых бизнес-моделях.

¹⁵ Наиболее яркие примеры – доминирование на ряде мировых высокотехнологичных рынков китайских компаний: Huawei, Lenovo, ZTE и др.

Изменение бизнес-моделей в связи с внедрением НПП происходит вследствие удешевления и упрощения координации исследований и разработок. Это может способствовать дальнейшему расширению использования «открытых инноваций»¹⁶. Эта концепция до недавнего времени была распространена преимущественно в таких высокотехнологичных отраслях, как фармацевтика и ИКТ-сектор¹⁷. В свою очередь, нарастание аутсорсинга исследований и разработок в обрабатывающей промышленности влечет за собой усиление роли малых и средних инновационных компаний в производственных цепочках. **Средние компании** становятся важными «узлами» кастомизированного производства.

С инфраструктурной точки зрения подобные изменения в производственных цепочках находят свое отражение в том, что растет число компаний, оснащенных высокотехнологичным оборудованием, и ориентированных на выполнение мелкосерийных заказов (так называемые фаб-лабы, джоб-шопы, ворк-шопы), в том числе – для инновационных фирм, которым требуется быстро и недорого изготавливать пробные партии продукции. Так, в США на долю подобных компаний в настоящее время приходится около 30% всего рынка металлорежущего оборудования¹⁸. Такие компании формируют своеобразную технологическую инфраструктуру для малого и среднего инновационного бизнеса. Создание сети оказывающих услуги компаний позволяет, с одной стороны, сократить необходимые инвестиции со стороны инновационных малых и средних предприятий, с другой – повысить загрузку технологического оборудования за счет заказов со стороны внешнего рынка.

1.5. Уровень готовности российской промышленности к разработке и внедрению новых производственных технологий

В настоящее время российская промышленность, несмотря на оставшиеся с советских времен технологические заделы, позволяющие сохранять конкурентоспособность в ряде высокотехнологичных отраслей (атомная энергетика, аэрокосмическая промышленность, отдельные сегменты ИТ), не входит в число лидеров развития НПП.

В большинстве отраслей, являющихся разработчиками НПП, в России сложилась сложная ситуация. Она обусловлена, с одной стороны, исчерпанием

¹⁶ Chesbrough H. (2003). Open Innovation: The new imperative for creating and profiting from technology. Boston: Harvard Business School Press.

¹⁷ Оганесян Т., Медовников Д. (2011) Собака пока на сене // Эксперт, №8.

¹⁸ Gardner (2014) Capital Spending Survey. Executive Summary.

конкурентоспособных заделов (например, в станкостроении, оборудовании для автоматизации и проч.), с другой – общими неблагоприятными условиями для инновационного развития компаний («дорогие» финансовые ресурсы, высокая степень обособленности отечественных компаний, «вымывание» высококвалифицированных инженерных кадров, медленный процесс внедрения новых стандартов и проч.). Существенной проблемой развития НПП в России является относительная «узость» внутреннего рынка, обусловленная не столько абсолютными масштабами промышленного производства, сколько ориентацией большинства крупных отечественных компаний на импорт готовых решений.

В то же время по ряду направлений (инженерное ПО, композитные материалы и изделия из них, легкие сплавы) отечественные компании сумели укрепиться на внутреннем рынке и сохранить технологический уровень, близкий к мировому. Спрос на НПП в России предъявляется, прежде всего, в машиностроительных отраслях. Его формируют крупные компании-интеграторы: так, на крупные компании в обрабатывающей промышленности в России приходится 98% всех расходов на технологические инновации, а доля расходов на НИОКР к выручке у машиностроительных предприятий почти в 4 раза выше, чем в промышленности в целом. Вместе с тем по сравнению с зарубежными компаниями расходы на НИОКР большинства российских предприятий крайне малы.

Это связано с тем, что спрос на технологические инновации в обрабатывающей промышленности в России удовлетворяется в основном за счет приобретения машин и оборудования, преимущественно импортных. Затраты на приобретение машин и оборудования составляют более половины всех затрат на технологические инновации. При этом инновационному развитию крупных компаний в значительной степени препятствуют не только общеэкономические проблемы (финансовые, кадровые и другие), но и архаичная организационная структура машиностроительных отраслей. Так, в наиболее высокотехнологичных отраслях (атомная энергетика, аэрокосмическая промышленность и др.), где доминируют госкомпании, сохраняется высокий уровень вертикальной интеграции, что тормозит формирование производственных цепочек в соответствии с новыми потребностями, диктуемыми НПП.

Небольшой сегмент крупных частных компаний, работающих в машиностроении, в основном стремится встраиваться в международные производственные цепочки через создание совместных предприятий, в которых иностранные компании выступают донорами передовых технологий, что также блокирует спрос частных компаний на отечественную продукцию и технологии НПП.

Переформатирование производственных цепочек с усилением роли малых и средних предприятий в значительной степени блокируется не только нежеланием крупных компаний выносить на аутсорсинг часть своих функций или запускать высоко рисковые проекты, но и слабостью существующей в России прослойки высокотехнологичных малых и средних фирм. На их долю в настоящее время приходится всего около 2% от совокупных затрат на технологические инновации в обрабатывающей промышленности, что на порядок меньше, чем в развитых странах.

1.6. Глобальные и национальные вызовы развитию новых производственных технологий

Глобальные вызовы и «окна возможностей»

Подход к определению научно-технологических приоритетов, базирующийся на оценке глобальных или национальных вызовов, получил в настоящее время широкое распространение. В России в ходе подготовки Долгосрочного научно-технологического прогноза экспертами НИУ ВШЭ было выделено более 20 глобальных вызовов¹⁹, затрагивающих экономическое, общественное, научно-технологическое и др. развитие.²⁰

После экономического кризиса 2008-2009 гг. во многих странах растущее внимание стало уделяться национальным, а не глобальным вызовам, в том числе в контексте развития технологических направлений, связанных с реиндустриализацией и решорингом производств. Глобальные вызовы при этом не игнорировались, однако отошли на второй план по сравнению с первоочередной задачей повышения конкурентоспособности национальных экономик. Так, в Великобритании с 2009 г. начался процесс активной разработки промышленной политики, нацеленной на повышение конкурентоспособности отдельных отраслей экономики. Во Франции в 2013 г. была принята стратегия «Новая индустриальная Франция» (La Nouvelle France industrielle)²¹, нацеленная на повышение конкурентоспособности французской промышленности.

¹⁹ НИУ ВШЭ (2013) Актуализация долгосрочного прогноза важнейших направлений научно-технологического развития на период до 2030 года.

²⁰ Среди глобальных вызовов, на которые ориентируются стратегии развития науки и технологий в различных странах, наиболее часто встречаются вызовы, связанные с истощением ресурсов (в частности – энергетических), экологическими проблемами, а также старением населения.

²¹ www.redressement-productif.gouv.fr.

Акцент на новые производственные технологии сделан потому, что предполагается - за счет их комплексного применения произойдет качественное обновление технологической платформы, на которой работает обрабатывающая промышленность. Для многих традиционных производств НПТ потенциально представляют собой «подрывные» технологии, формирующие новые технологические процессы и стандарты, вытесняющие традиционных производителей с рынков (например, в области ремонта сложных изделий, производства деталей сложных геометрических форм и т.п.).

Таким образом, развитие НПТ, с одной стороны, будет способствовать появлению новых возможностей с точки зрения перераспределения производства добавленной стоимости в рамках глобальных цепочек в пользу стран, активно развивающих НПТ. С другой стороны – их развитие создает угрозу потери традиционных ниш на мировых рынках для тех стран, которые будут медленнее входить в новую систему международного разделения труда.

Потенциальные вызовы и возможности для России

Актуальность развития НПТ для России, также, как и для ряда развитых стран, обусловлена, прежде всего, необходимостью ответа на макроэкономический вызов снижения конкурентоспособности экономики. В то же время причины снижения конкурентоспособности России несколько отличаются от характерных для развитых стран. В России долгосрочное снижение конкурентоспособности экономики является следствием не вывода производств за рубеж, а деградацией оставшихся со времен СССР технологических заделов и исчерпанием традиционных ресурсных источников роста²², что во-многом обуславливает стагнацию экономики в настоящее время.

Поэтому перед Россией *стоят задачи не возвращения компаний из-за рубежа или укрепления отечественных технологических лидеров на базе сохранившейся мощной научной базы, а фактически создания с очень низкого базового уровня новой средне- и высокотехнологичной промышленности.*

Специфическим для России вызовом также является крайне низкий уровень участия бизнеса в технологическом развитии национальной экономики, что обусловлено происходившей в России в последние годы деиндустриализацией и деqualификацией

²² Традиционные источники роста экономики России, такие как добыча углеводородных ресурсов, дешевая стоимость энергоресурсов и рабочей силы постепенно исчерпываются под влиянием как внешних (сланцевая революция в США, усиление конкуренции со стороны Китая и прочих развивающихся стран), так и внутренних факторов (истощение легкодоступных углеводородных ресурсов, повышение внутренних цен на газ, опережающий рост заработной платы).

экономики. Эти процессы можно диагностировать на основе ряда параметров, в том числе таких, как²³:

- 1) сокращение удельного веса промышленности в ВВП (хотя может и характеризовать структурные сдвиги);
- 2) преобладание добывающих секторов над обрабатывающими;
- 3) сокращение уровня автоматизации производства;
- 4) сокращение объемов и качества продукции, рост импорта.

Дополнительным фактором, актуализирующим необходимость развития НПП в России, является также крайне высокая зависимость российской экономики от поставок зарубежного оборудования и технологий, что ведет к проблемам как с конкурентоспособностью производства технологически-сложной продукции (которое во многом опирается на ноу-хау в области оборудования, на котором его производят), так и с безопасностью. Введённые против России в 2014 г. внешнеэкономические санкции дополнительно обостряют указанные выше проблемы.

Развитие НПП, обладающих потенциалом переформатирования производственных цепочек, дает России возможность быстрого рывка в области создания отечественной технологической базы передового уровня, локализации производств технологически сложной продукции без необходимости длительного периода догоняющего развития, а также наращивания участия бизнеса в технологическом развитии за счет развития практик аутсорсинга. С другой стороны, в условиях значительного отставания от развитых стран по ряду направлений в научной сфере, а также уровню развития промышленности, успешное развитие НПП в мире несет крайне высокие риски углубления технологического отставания России и потери позиций на традиционных высокотехнологичных рынках (аэрокосмические рынки, рынки вооружений, рынки атомной энергетики).

²³ О.С.Сухарев. Индустриальная политика и развитие промышленных систем // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2014. N15. С. 2-21.

2. Ключевые технологии, формирующие облик перспективного производства в мире и место России

Организация и управление	Замысел, Проектирование/Конструирование, КТПП, моделирование	Данные о продукте, объекте, системе
	Материалы	Детали, узлы
	Формообразование и Обработка	
	Закупка покупных и комплектующих изделий	ПКИ
	Сборка	Изделие, объект, система
	Тестирование и сертификация	Продукт
	Эксплуатация (содержание и ремонты)	Продукт
	Модернизация	Продукт
	Утилизация	

2.1 Перспективные технологии организации и управления производством

2.1.1 Определения и сокращения

Технологии организации и управления производством (ОУП) это подходы, методы, стандарты, инструменты организации взаимодействия между производственными единицами и управления ими в ходе производственного процесса. Под производственными единицами понимаются (оборудованные) рабочие места, производственные участки, цеха, комплексы, заводы, производственные фирмы и объединения, а также проекты и проектные программы, постоянные или временные организации. В силу сложности современных изделий/объектов/систем определение производственного процесса невозможно сузить до процесса выпуска конкретных деталей. Необходимо рассматривать также проектирование/конструирование, подготовку производства, модернизацию, поддержку эксплуатации и утилизацию результатов производства.

В составе технологий ОУП целесообразно выделять методическую часть (подходы, методы и методики, стандарты, модели) и инструментальную часть (регламентирующие документы и информационно-технологические средства).

Современные информационно-технологические средства являются важнейшим компонентом перспективных технологий ОУП, в существенной степени реализующим эти технологии на практике, и в ряде случаев именно развитие ИТ-средств позволило создать и внедрить соответствующие перспективные технологии ОУП.

Технологии организации и управления производством, в том числе перспективные, непосредственно реализуются в виде производственных и бизнес-процессов, выполняющихся в соответствие с регламентирующими документами и с использованием соответствующих информационно-технологических средств. Эти документы и средства составляют инструментальную часть технологий ОУП и с необходимостью отражают все особенности конкретных организаций, производства, кооперации и результатов производства – изделия/объекта/системы. Специфика конкретных организаций не является предметом данного доклада, поэтому ниже описываются методические аспекты ОУП – подходы, методы и методики, стандарты, модели.

Сокращения:

ППТ - перспективные промышленные технологии

ОУП - организация и управление производством

2.1.2 Мотивация

За последние десятилетия в мировой практике организации и управления производством произошли существенные изменения, кардинально повысившие эффективность производства в целом и его элементов. Эти изменения позволили решить проблемы обеспечения качества конечных изделий/объектов (и комплектующих), соблюдения сроков, контроля себестоимости изделий/объектов.

На практике был создан и внедрен целый ряд современных подходов и методов управления. Важно отметить, что эти методы носят «надиндустриальный» характер - несмотря на существенные отраслевые различия между производством высокотехнологической продукции различных видов, а также сложных инфраструктурных объектов и комплексов (например, изделий авиационно-космической техники с одной стороны, и создание и эксплуатация атомных энергоблоков – с другой), упомянутые методы базируются на единых системных подходах: результаты производства - сложные изделия/объекты/комплексы - рассматриваются как сложные системы и учитывается весь их жизненный цикл.

Эти методы задали принципиально новые отношения между предприятиями внутри производственных коопераций разработчиков-производителей, а также с организациями Заказчика. Фактически, они сформировали новый уклад в разделении труда: произошел переход от управления предприятием к управлению кооперацией,

связанной с изделием/объектом/системой, и от выпуска изделий / сооружения объекта к управлению жизненным циклом изделий/объектов/систем.

Дальнейшим развитием технологий ОУП является движение к «облачному производству», «производству как сервис», «виртуальным предприятиям» и тд в рамках таких программ как, например, Industry 4.0 [Ind4.0], Smart Manufacturing [SM], Manufacturing Cloud [MC]. Эти инициативы были приняты практически во всех индустриальных странах в последние несколько лет. Они направлены на переход от массового производства к гибкому кастомизированному, при сохранении экономической эффективности массового производства и достижении высокой экологической эффективности.

В то же время парадигма организации и управления производством в России практически не изменялась с 1980х годов. Сложность высокотехнологичных изделий/объектов/систем и большое количество взаимосвязанных организаций-исполнителей, участвующих в кооперации по созданию изделий/объектов/систем, вызывает общеизвестные проблемы соблюдения сроков разработки и запуска изделий/объектов/систем в производство, обеспечения качества, контроля их себестоимости.

2.1.3 Современные направления и результаты развития технологий организации и управления производством

Международная практика показывает, что для успешно решения этих проблем в управлении производством в последние десятилетия реализуются концепция «расширенного предприятия», применяются системно-инженерные подходы и специальные методологии (например, Defense Acquisition System, [DoD] - управление заказом и приобретением).

Все эти концепции и подходы рассматривают изделия/объекты как единую сложную систему, а предприятия кооперации – как единый производственный комплекс, обеспечивающий весь жизненный цикл изделия/объекта/системы (разработку, производство, поддержку эксплуатации и утилизацию) в тесном взаимодействии с организациями Заказчика.

Во-первых, такая логика задает производственно-технологическую основу интеграции предприятий в кооперацию и управления ими на новых принципах. Именно использование этих принципов обеспечивает эффективность разработки и производства. Это аналогично тому, как финансовая и акционерная основа используются для

объединения предприятий в холдинговые структуры (или другие формы юридического объединения) и для корпоративного управления. В Российской промышленности управление производством, как правило, осуществляется в рамках отдельного предприятия независимо от предприятий-соисполнителей, а чаще – даже в рамках одного подразделения в отрыве от смежных подразделений внутри предприятия. На Российских предприятиях производственные и бизнес-процессы, как правило, складываются стихийно, в процессе работы, крайне редко встречаются случаи целенаправленной оптимизации бизнес-процессов (то, что повсеместно происходило на Западе в 80е-90е годы прошлого века в период массового увлечения business process reengineering). В результате соседние подразделения часто работают в отрыве друг от друга: не синхронизируя графики работ и не интегрируя производственные данные. Когда предприятия создают простые независимые изделия или объекты, фрагментированное управление не снижает эффективность производства. Однако при совместной работе над изделием/объектом/системой такой подход приводит к дезинтеграции управления, возникновению разрывов в производственных процессах, что негативно сказывается на эффективности производственной цепочки в целом.

Во-вторых, системно-инженерные подходы предполагают применение ряда правил или регламентов, повышающих эффективность производственных процессов. Эти приемы многократно проверены на практике и описаны в соответствующих стандартах. Они касаются, прежде всего, систематизации всех требований к характеристикам изделиям/объектам со стороны Заказчика, постоянного доведения этих требований до всех участников кооперации (в части касающейся), регулярного контроля реализации требований в проектных решениях, контроля процедур внесения изменений в проектные решения по изделию/объекту/системе, контроля структуры, основных и альтернативных проектных решений, контроля рисков и себестоимости изделия/объекта/системы, широкого использования междисциплинарного моделирования.

В-третьих, специальные методологии управления заказом (например, Defense Acquisition System, [DoD]) обеспечивают эффективный контроль над реализацией сложных технологических программ в условиях высокой технологической неопределенности. Проектные программы создания новых образцов изделий/объектов не могут быть «куплены готовыми» - в них всегда присутствует большая доля НИР, следовательно, большие технологические риски, и ни один подрядчик не сможет реализовывать такую программу как многократно повторенную с известными проблемами и рисками. Это затрудняет управление стоимостью таких программ: на практике

невозможно использовать контракты с фиксированной ценой. Несмотря на различные юридические форматы взаимоотношений между Заказчиком и кооперацией исполнителей, практически всегда реализуется принцип «затраты+» (часто путем обоснованного пересмотра контрактных обязательств), что отражает объективную экономико-технологическую основу таких программ. Однако при таких условиях исполнители не заинтересованы в повышении эффективности своей работы, что приводит к необоснованным расходам. Поэтому контроль «результат против затрат» со стороны Заказчика приобретает ключевое значение, фактически Заказчик в такой программе вынужден нести наиболее существенные технологические и проектные риски. Специальные методологии управления заказом как раз и разработаны для решения этих задач.

В-четвертых, все большее значение приобретает сочетание инженерных и экономических подходов, прежде всего, в части анализа затрат и оценивания эффектов на всем жизненном цикле сложного изделия или объекта. Современные зарубежные практики интегрируют отдельные предприятия-юридические лица в расширенные предприятия «вдоль жизненного цикла изделия/объекта», а также сосредотачивают в одном «центре» и технические, и экономические, и организационные способы управления. При этом особое внимание уделяется максимально возможной унификации и стандартизации производственных процессов как основы обеспечения высокого стабильного качества, контролируемых сроков и себестоимости. Регламентируются не только рутинные процессы массового производства, но также и процедуры создания новых изделий, материалов, технологий (стандарты и подходы Product Development Process широко обсуждаются в специальной литературе и внедряются в ведущих компаниях).

В-пятых, информационно-технологические системы заняли особое место в производственном управлении: они стали совершенно необходимым инструментом, который обеспечивает и быстрый и удобный информационный обмен, и объединение участников кооперации, находящихся на существенном географическом удалении, и возможность хранения больших массивов информации об изделиях (объектах) с вариантами и возможностью удобного доступа, и многое другое. Развитие ИТ обеспечило существенный прогресс в следующих трех направлениях:

1. **«Замена кульмана и рейсшины».** CAD, CAM, CAPP системы кардинально облегчили и ускорили проектные и конструкторские работы, прежде всего за счет

массовой автоматизации рутинных, относительно простых, но трудоемких, операций.

2. **«Замена логарифмической линейки».** Появилась возможность «тотальных дешевых инженерных расчетов и моделирования»: стало возможным моделировать суперсложные объекты, например, свойства веществ и материалов (direct numeric simulation и аналогичные подходы); также стало возможным «дешево» моделировать массовые предметы; стало возможным и целесообразным «сначала все проверить на модели, а потом отлить в металле» или «сам нарисовал – сам быстро сделал». Развитие технологий «быстрого прототипирования» (аддитивные и аналогичные им) ускорило этот тренд.
3. **«Слом организационных границ внутри кооперации».** В результате глубокой интеграции рабочих мест и производственных единиц путем внедрения сквозных производственных процессов и единых стандартов представления данных возникли географически распределенные «расширенные предприятия» и виртуальные рабочие группы, внутри которых практически отсутствуют границы между оргединицами. Дальнейшим развитием таких форм кооперации и организации производства являются «облачное производство», «производство как сервис» и тд.

Важно отметить, что на Российских предприятиях современные ИТ-средства внедрены достаточно широко, и «замена кульмана и рейсшины», как и «логарифмической линейки» во многих случаях произошло. Однако из-за массовой фрагментарности бизнес-процессов организационные барьеры сохранились не только в рамках кооперации, но и внутри отдельных предприятий, что и приводит к потерям эффективности производства в целом.

В результате развития современные системы ОУП компаний – индустриальных лидеров, таких как Boeing, Lockheed-Martin, BAE, General Dynamics, Raytheon, BMW, Toshiba, реализуют и используют:

1. Системно-инженерные подходы:
 - Концепции жизненного цикла (ЖЦ) [INCOSE_Hb] и процессы управления жизненным циклом продукта/объекта/системы (Product Lifecycle Management, PLM [CIMData], [15288]) в том числе «ворот принятия решений» (Decision Gates); планирования и контроля ресурсов, затрат, финансовых результатов, рисков на всех стадиях ЖЦ изделия/объекта/системы, например, Total Ownership Cost, Total Cost Management [TCM]; управления сроками эксплуатации изделий/объектов/систем [PLf].

- Управление требованиями [29148], конфигурацией [10007], [СМII] изменениями, параллельное проектирование, виртуальные рабочие группы и их совместная работа, использование опыта и наработок.
2. Модульность, платформы, крупноблочная сборка и монтаж.
 3. Моделе- и дата-центричность
 4. Управление проектными программами и проектами в целом [PMI], также различные расширения, такие как [EVM] и [IPD]
 5. Концепции расширенного предприятия [CIMData], интеграция данных и процессов [interoperability].
 6. Универсальные формализмы представления данных, такие как язык представления сетевых онтологий OWL [OWL], стандарт представления CAD-данных STEP NC [14649] и [10303], средства описания объектов стандарта ISO 15926 [15926].
 7. Концепции «непрерывных улучшений» - TQM, LEAN [LEAN] и другие.
 8. Принципы безбумажного документооборота (текстовый оборот исключен).
 9. Управление “on-line”: отчетность, перепланирование, формирование производственного задания, закрытие периода и и другие операции выполняются «нажатием одной кнопки», практически автоматически, без привлечения сотрудников; выполнение операций регистрируется в системе “on-line”.

Как итог, современные системы ОУП обеспечивают следующие ключевые возможности:

- прогнозирование и контроль **сроков и стоимости** разработки и выпуска изделий/объектов/систем, а также проектов и проектных программ;
- обеспечение требуемого **качества** изделий/объектов/систем в целом, отдельных компонентов и работ;
- создавать новые изделия/объекты/системы в заданные сроки, прогнозировать и максимально учитывать потребности заказчиков;
- переходить к контрактам жизненного цикла, к «продаже (боевых) возможностей» вместо продажи изделий, осуществлению сервиса в соответствие с «соглашениями об уровне сервиса».

2.1.4 Новые тренды развития технологий организации и управления производством

Дальнейшее развитие тенденций, описанных в предыдущем разделе, происходит в форме следующих трендов:

1. Инициативы развития производственных интеллектуальных систем и подходов (manufacturing intelligence), такие как Industry 4.0 [Ind4.0], и Smart Manufacturing Leadership Coalition [SM].
2. Дальнейшая глобализация кооперации (Global Product Development) [GPD];
3. Новые формы кооперации и межорганизационного взаимодействия, такие как Virtual Enterprise [BIVEE] и альянсы [HCAWD];
4. Переход к «производству как сервису»[MaaS] и «облачному производству» [MC];
5. Создание инфраструктуры «облачного производства» - Industrial Internet [IndInt1], [IndInt2], [MDA];
6. Отделение и аккумуляция невещественных функций: маркетинг, концепт/требования, архитектура, кооперация, сертификация, продажи, сервис.

Инициативы развития производственных интеллектуальных систем и подходов.

Специалисты практически всех развитых стран считают, что экономика находится на пороге 4й промышленной революции, в основном под влиянием развивающихся информационных технологий, сближающих и интегрирующих реальный, вещественный, и виртуальный, информационный, мир. Промышленность будущего будет характеризоваться:

- существенной индивидуализацией продукции при условии высокой гибкости крупносерийного производства;
- глубокой интеграции потребителей и производителей в рамках сквозных процессов всего жизненного цикла и всей цепочки создания стоимости / потребительской ценности (value adding chain);
- связью процессов выпуска и сервиса продукции и формирования таким образом «гибридных продуктов».

Осознавая эти тенденции, правительственные организации и промышленность различных стран инициирует такие инициативы как Industry 4.0 [Ind4.0], Германия и Smart Manufacturing Leadership Coalition [SM], США, а также организации технологического развития National Network for Manufacturing Innovation [NNMI], American Lightweight Materials Manufacturing Innovation Institute [ALMMII], National Center for Defense Manufacturing and Machining [NCDMM].

Проект Industry 4.0 охватывает как промышленные технологические, так и социальные аспекты развития. Это проект направленный на опережающее развитие информационных и компьютерных технологий и вовлечение академических исследователей и крупную

промышленность, так ведущую роль в проекте играет Siemens. Некоторые из компонентов Industry 4.0 уже появляются и используются сейчас, в частности производственный интернет, стандарты обмена промышленными данными, моделирующее программное обеспечение, что придает участникам и экспертам уверенность в реализуемости проекта в целом.

Проект Smart Manufacturing, инициированный рядом американских правительственных агентств и ведущих промышленных компаний, направлен на интегрирование в реальном времени и в рамках производственных сетей информации и данных, отражающих все аспекты требований, концепций, конструирования, проектирования, производства, логистики, эксплуатации, сервиса продукции, то есть «производственный интеллект». Это достигается путем внедрения большого количества измерительных датчиков, объединения их сетями, сбора и обработки информации от них, совместно с моделированием производственных и других процессов для выработки решений в режиме реального времени.

Цели проекта Smart Manufacturing включают:

- Разработку референтной SM (Smart Manufacturing) архитектуры, основанной на стандартах, инициируемой промышленными компаниями и поддерживаемой ИТ-разработчиками;
- Создание SM-платформы разработки, включающей среду разработки с открытой архитектурой;
- Реализация R&D проектов в области SM-систем;
- Способствовать привлечению финансирования для таких проектов;
- Создавать пилотные зоны для внедрения SM-систем;
- Аккумулировать и гармонизировать требования к SM-системам от малых, средних и крупных компаний;
- Создавать и облегчать доступ к новым дешевым датчикам и сетевым технологиям.

Дальнейшая глобализация кооперации

Если течение в последних нескольких десятилетиях наблюдалась глобализация цепочек производителей с целью объединения функций производства, сейчас возникает тенденция глобализации команд разработчиков продуктов [GPD]. Сложность продуктов требует разнообразных компетенций разработчиков, что приводит к необходимости объединения интернациональных географически распределенных групп в рамках единой команды. Кроме того включение региональных разработчиков позволяет оперативно и более точно

реагировать на потребности локальных рынков. Следующие направления выделяются как ключевые для обеспечения глобальной интеграции процесса разработки продуктов:

- Управление CAD-данными о продукте, сформированными в различных исходных CAD-системах;
- Управление данными о составе продукта (Bill of Material data);
- Управление множеством конфигураций одновременно;
- Управление глобальным распределенным процессом внесения изменений;
- Управление совместной работой распределенных групп (collaboration capabilities);
- Управление классификаторами состава изделия;
- Управление поставщиками/субподрядчиками.

Первые четыре области связаны с формированием данных о продукте и управлением ими. Пятая область является критичной для обеспечения эффективной совместной работы заинтересованных лиц внутри компании, членов аутсорсинговых команд разработчиков и большого числа географически удаленных зарубежных поставщиков/субподрядчиков. Сбор и накопление исторических и актуальных данных об изделии включая данные механических, электрических и других CAD-систем является совершенно необходимым для выполнения разработок в срок и в рамках бюджета. Заключительные из выделенных областей являются ключевыми для управления рисками и стоимостью разработки и производства продукта.

Новые формы кооперации и межорганизационного взаимодействия, такие как альянсы, Virtual Enterprise

Концепция «виртуального предприятия» (virtual enterprise) интенсивно развивается в последние годы, для «виртуального предприятия» (ВП) дано много определений, например, ВП – это временная сеть независимых организационных образований, в том числе бизнесов и специалистов, которые работают на самопроизвольном основании, для развития своих конкурентных преимуществ. Они вертикально интегрируются для объединения своих основных компетенций и функций в единую организацию.

В рамках общеевропейской программы исследований и технологических разработок выполняется целый ряд проектов, направленных на развитие концепции ВП, сетей предприятий:

- Business Integrator Dynamic Support Agents for Virtual Enterprise (BIDSAVER) from January 2000 through June 2002;

- Working group on Advanced Legal Issues in Virtual Enterprise (ALIVE) from January 2000 through December 2002;
- Legal issues for the advancement of information society technologies (LEGAL-IST) from April 2004 through March 2007;
- European collaborative networked organizations leadership initiative (ECOLEAD) from April 2004 through March 2008;
- Secure Process-oriented Integrative Service Infrastructure for Networked Enterprises (SPIKE) from January 2008 through December 2010;
- Glocal enterprise network focusing on customer-centric collaboration (GloNet) from September 2011 through August 2014;
- Business Innovation and Virtual Enterprise Environment [BIVÉE] from September 2011 through August 2014;

В рамках данных проектов разрабатывается широкий круг тем от законодательных основ ВП до поддерживающих программных продуктов.

Проект Business Innovation in Virtual Enterprise Environments (BIVÉE) ориентирован на создании специальной информационно-технологической среды, которая поддерживает повышение производительности и инновационное развитие малых и средних предприятий, объединенных в сеть и образующих ВП.

Европейские регуляторы считают, что индустрия Европы нуждается в поддержке и ускорении развития для сохранения конкурентных преимуществ на глобализирующемся рынке, непрерывные улучшения и инновации должны стать естественной потребностью предприятий [BIVÉE].

Европейская промышленность характеризуется большой долей малого и среднего бизнеса, для того чтобы развивать новые технологии и инновации необходима сетевая «экосистема», объединяющая малый и средний бизнес для консолидации ресурсов и создания «критической массы».

BIVÉE-среда включает современные методы усиления креативности и инновативности на основе открытых подходов, специализированные LEAN-методики отслеживания конкретных результатов и управления сетью предприятий, создания репозиторий знаний, средств коллективного интеллекта. Разрабатываемые инструменты моделируют предприятие, создают таким образом тестовую для развития и проверки новых идей и подходов.

Другой новой формой совместной работы является создание промышленных альянсов, этот подход разрабатывается и реализуется в рамках программы разработки перспективного эсминца ЗУРО (Air Warfare Destroyer) для ВМС Австралии [AWD].

Участниками альянса являются Австралийское правительственное агентство Defence Materiel Organisation (DMO), Австралийские промышленные компании ASC и Raytheon Australia, а также партнеры – испанская кораблестроительная фирма Navantia и Lockheed Martin из США.

Целью такой формы организации было улучшение работы кооперации (сроки, бюджет, управление рисками и боевыми возможностями корабля) за счет слома барьеров между промышленностью и заказчиком, а также между организациями промышленности между собой на основе принципа «разделяем проблемы и разделяем заслуги» (pain-share and gain-share). Альянс основан на специальном договоре Alliance Based Target Incentive Agreement (ABTIA) определяющем кооперацию и совместное принятие решений, а также управление внутри альянса с целью защиты интересов заказчика.

Основными преимуществами альянса как формы организации являются:

- Все участники работают, фокусируясь на общем результате и избегая неконструктивного соперничества, что характерно для контрактов с фиксированной ценой;
- Риски и ответственность разделяются и управляются совместно, что снижает конфронтацию между участниками;
- Участники от промышленности могут улучшать свой финансовый результат только за счет эффективности, тк незапланированные работы не дают прибыли;
- Прибыль и проблемы разделяются между правительственным участником и промышленностью эквивалентно;
- Ориентация на бизнес-результат стимулирует при принятии решений подход «делать как можно лучше для проекта»;
- «Слом перегородок» между основными участниками уничтожило долгие и затратные дискуссии между ними.

Эти преимущества достигаются за счет следующих организационных особенностей альянса:

1. Участие Заказчика в процессе разработки и производства (агентство DMO) что делает проектную программу абсолютно прозрачной для Заказчика, это

соответствует идеологии [DoD], являющейся обязательной для применения в заказах Министерства обороны США;

2. «Сквозные» производственные процессы в рамках кооперации, закрепленные через договор альянса и непосредственно обеспечивающие тот самый «слом перегородок» между всеми участниками;
3. Специфические экономические условия договора, задающие правила ценообразования от объема работ. Основной объективной экономической проблемой таких проектных программ является именно ценообразование (раздел 2.1.3, про "затраты+"). Эта проблема решается применением идеи ценообразования опционов, исходя из ожидаемой волатильности базового актива. Аналогом волатильности приняты колебания отклонений сроков/стоимостей подобных проектов, взятые из исторических данных. Известно, что подобные долгосрочные договоры, реализующие идею "risk/profit sharing", заключает крупнейшая авиастроительная корпорация с поставщиками заготовок и деталей из металла для снижения рисков колебаний на сырье в долгосрочном периоде.

Участники альянса сформировали устойчивую структуру управления, включающую:

- Управляющий Совет с независимым председателем во главе и представителями всех участников и заказчика;
- Комитет проекта во главе с Руководителем проекта от DMO, в составе управляющих директоров ASC, Raytheon, а также управляющим директором альянса
- Управляющую оперативную команду, включающую директоров и менеджеров организаций альянса.

В целом ответственность участников альянса включает:

- DMO – общая ответственность перед государством за выполнение проекта в целом в срок и с требуемыми боевыми возможностями,
- ASC – как крупнейшая кораблестроительная корпорация Австралии отвечает за проектирование и постройку кораблей в целом: постройку блоков (применен метод крупноблочной сборки, поставщики отвечают за отсеки корабля в целом), за интеграцию блоков, интеграцию оружия и других систем, сборку на заводе; контрактацию по отдельным блокам; проектирование в целом; управление поставщиками основного оборудования и оружия; планирование и контроль; испытания и передачу в состав флота.

- Raytheon Australia отвечает за разработку и интеграцию всех систем – управления, оружия, связи и тд.
- Navantia является разработчиком эсминца, выбранного в качестве аналога для создаваемого корабля, поэтому отвечает за разработку корабельной платформы и поставляет отдельные блоки.
- Lockheed Martin является разработчиком единой (для НАТО, США и союзников) корабельной ракетной системы Aegis и поэтому отвечает за интеграцию этой системы в проект.

Переход к «облачному производству» и «производству как сервис».

Концепция «облака» предполагает, что пользователи переносят/передают в «облако» функции для последующего использования по принципу «когда необходимо, плачу-пользуюсь» (pay-to-play architecture). Первоначально эта архитектура была отработана в ИТ области, сейчас делаются попытки реализовать «облачное» производство [MC] и производство-как-сервис (MaaS) [MaaS].

Идея MaaS не сводится к аутсорсингу производственной функции, она рассматривается как путь реализации кастомизированного производства по заказу, она тесно связана с организацией взаимодействия между производственными единицами и виртуальными предприятиями.

Проект “The ManuCloud” выполняется консорциумом Европейских промышленных компаний и университетов также в рамках общеевропейской программы исследований с целью тестирования концепции сервис-ориентированных ИТ-средств в качестве платформы для сетей производственных предприятий, реализуя, таким образом, видение «облачного» производства.

Результаты проекта позволят потребителю использовать производственные возможности реконфигурируемых виртуальных производственных сетей, на основе объединенных производственных площадок, поддерживаемых специализированным программным обеспечением.

Один из образцов разрабатываемого в рамках проекта программного обеспечения предназначен для создания библиотеки «инкапсулированных» производственных сервисов с возможностями удаленного доступа. Основой является высокоскоростная сеть передачи данных соединяющая «микрофабрики» под управлением ИТ-средств моделирования, проектирования, планирования, технологической подготовки производства и тд.

Интеграция цифровых производственных технологий с очень гибким операционным менеджментом обеспечит оперативный контроль над процессами проектирования, изготовления, контроля качества во всей глобальной производственной сети.

Переход к кастомизированному гибкому производству, как уже отмечалось, является основным направлением развития производства, основным предпосылками для этого является готовность гибких ИТ-систем, поддерживающих «облачное» производство, с одной стороны и производственные процессы и физические производственные единицы с другой. Проект ManuCloud был запущен именно для исследования ИТ-производственных аспектов такого перехода и для разработки и проверки тестовых образцов ИТ-инфраструктуры. Пилотирование проекта осуществлялось в трех индустриях – фотовольтаика, органические светодиоды и поставщики автоиндустрии.

Важно отметить, что современные станки / обрабатывающие центры «готовы для включения в производственное облако»: практически стандартом стало использование роботов-манипуляторов (для смены инструмента, головок, держателей, обрабатываемых деталей), контроллеров и средств коммуникации для включения в сеть. Также оборудование порождает большое количество производственных данных, интенсивно развиваются протоколы обмена, общие многоплатформенные информационные среды и тд. Информационная часть производства также готова к «облаку».

Создание инфраструктуры «облачного производства»

Несколько современных направлений развития ИТ не относятся к технологиям ОУП, но создают инфраструктуру развития ОУП, в частности «облачного производства», к этим направлениям относятся интернет вещей (internet of things), межмашинное взаимодействие (M2M), промышленный интернет (industrial internet), большие данные (Big Data). Эти области пересекаются, их границы не являются точно определенными, но для целей данного отчета важным является их влияние на «облачное производство», это влияние и будет рассмотрено.

Интернет вещей (internet of things, IoT) – область охватывающая уникально идентифицируемые объекты, их виртуальное представление в интернет-подобной среде и информационный обмен (взаимодействие) через эту среду. IoT формирует сеть приборов (датчиков, исполнительных механизмов, «микрофабрик») путем их горизонтальной интеграции. Применительно к ОУП IoT обеспечивает сбор данных/знаний о функционировании «производственного облака», контроль производственной и внешней

среды, сравнивает приборы в рамках всей сети, позволяет предугадывать проблемы в такой сети и выявлять шаблоны поведения.

Межмашинное взаимодействие (M2M) – широкая область, охватывающая любые технологии, обеспечивающие проводное или беспроводное автоматическое взаимодействие между механическими или электрическими приборами. Эта область очень близка предыдущей, различия в том, что M2M рассматривает в большей степени именно взаимодействие, а не сеть. Как правило, взаимодействующие приборы имеют уникальные идентификаторы, состоят из датчиков, исполнительных механизмов, коммуникационных средств, автономного управляющего программного обеспечения. M2M обеспечивает именно информационный обмен – мониторинг состояния приборов, выявляет ошибки и сбои приборов, позволяет удаленно администрировать и реконфигурировать приборы и тд.

Промышленный интернет (industrial internet) обычно подразумевает интеграцию сложных физических машинных комплексов с сетевыми датчиками и программным обеспечением, обычно реализуется на параллельной интернету инфраструктуре, на общих или частных каналах, является более защищенным, за счет дополнительных средств защиты данных.

Большие данные (Big Data, BD) часто понимаются как область методов и инструментов обработки больших и сложных (за счет разнородности, неизвестности взаимосвязей и скорости появления) массивов данных. Методы BD обеспечивают анализ и исследование возникающего, неизвестного поведения сложных систем, облегчение, удешевление, ускорение принятий решений, более точное исследование предпочтений пользователей, за счет этого экономию ресурсов при разработке, производстве, сервисе и тд.

Большинство из вышерассмотренных областей имеют не только промышленное применение, поэтому они и рассматриваются как инфраструктура ОУП, все вместе они также обеспечивают следующие возможности:

- Многоаспектный анализ производственной среды и окружающей среды;
- Самообучение на основе собираемой информации;
- Проактивное принятие бизнес-решений;
- Интегрированный человеко-машинный анализ данных;
- Использование предсказывающих алгоритмов и подходов;
- Интеграция с бизнес-системами.

В качестве примера информационных инструментов, реализующих перечисленные технологии можно упомянуть создание интегрирующих программных продуктов (для всех платформ – Win, iOS, Andr...) для «легкого» объединения через «облако» автоматических обрабатывающих центров и рабочих мест конструкторов, технологов и тд [MF].

Отделение и аккумулярование не вещественных функций: маркетинг, концепт/требования, архитектура, кооперация, сертификация, продажи, сервис;

Существенным трендом в области ОУП является обособление и аккумулярование не вещественных производственных функций, происходящее оп двум причинам. С одной стороны продукты производства становятся все сложнее и дизайн и другие не вещественные составляющие продукта занимают все большую долю в себестоимости и цене, соответственно, не вещественные функции становятся все более и более маржинальными. С другой стороны сложность конечных продуктов требует усложнения процессов заказа и приобретения новых типов изделий/объектов/систем особенно в военно-промышленном комплексе [DoD] и капитальной индустрии [Cross_Rail].

В результате компании, выпускающие конечный продукт, (автопроизводители, производители авиационной техники и другие) выполняют функции исследования и прогнозирования рынка и спроса, формирование концепта продукта, формирование технических требований, проектирование/конструирование продукта, конечную сборку, сертификацию, продажи, послепродажный сервис. Непосредственное изготовление компонентов все больше и больше передается специализирующимся на этом поставщикам. Происходит естественное разделение ниш: изготовители получают прибыль от технологической специализации и от объемов выпуска, производители конечного продукта – от дизайна, интеграции и сервиса.

Ярким примером является iPhone. По интернету «гуляет информация» о распределении себестоимости айфона. [cc iPhone]: стоимость всех компонентов iPhone 5s 16 Гбайт составляет 191 доллар, еще 8 долларов затрачивается на сборку устройств, т. е. общая сумма составляет 199 долларов., а сам iPhone продается в США за 649 долларов. Соответственно, основной добавленной стоимостью в таком высокотехнологичном продукте оказывается его дизайн, сертификация, маркетинг и продвижение.

Аналогично, Boeing анонсирует, что более 60% комплектующих Dreamliner'a поступает от субподрядчиков, и в дальнейшем Boeing Commercial Airplanes планирует получать БОльшую часть прибыли от инженерных разработок. Важно отметить также, что

подавляющее большинство субподрядчиков Boeing работают также и с Airbus, Bombardier, Embraer. То есть отрасль гражданского самолетостроения практически полностью как несколько очень крупных фирм, выпускающих конечный продукт и «облако» узкоспециализированных поставщиков узлов, оборудования и тд.

Еще одним примером является компания Cross Rail [Cross_Rail], учрежденная правительством Великобритании для строительства новой высокоскоростной железнодорожной системы в Лондоне (в дополнение существующей). Этот крупнейший в Европе инфраструктурный проект с бюджетом £14.8bn стартовал в 2009, 1й поезд должен пройти в 2018г. Ко 2му кварталу 2014г практически завершена подземная проходка под центральной частью Лондона (около 35 км), при этом отставание от исходного графика составило 1 неделю, перерасхода бюджета - нет.

Cross Rail был создан для выполнения функции *acquirer'a* - управления проектной программой создания сложной транспортной системы и интегрирования ее в сложный мультисистемный контекст:

- управления генподрядчиками (их несколько, они разделяют строящуюся сеть по географическим фрагментам) и контроль подрядчиков следующих уровней;
- управления генпроектировщиками (тоже несколько);
- взаимодействия с регуляторами (около 10 организаций, внутри старого Лондона, в центре, в том числе археологический надзор);
- управления обликом объекта (требования, конфигурация и тд)
- аккумулирования документов/данных для сертификации и передачи в эксплуатацию (commissioning и handover) - также нескольким организациям;
- и т.д.

Штат самого Cross Rail составляет около 300 человек, организованы выделенные подразделения управления требованиями, управления конфигурацией, управления создаваемой транспортной системой в целом, управления документами, поставками, и тд, которые реализуют соответствующие функции.

Основные проблемы проектной программы не технические – тоннели, станции, подвижной состав, автоматика и тд не представляют собой ничего нового. Основные проблемы находятся в области организации проектной программы в целом, координации исполнителей, взаимодействии с регуляторами, финансирующими организациями, аудиторами, будущими владельцами-эксплуатирующими организациями, а также

организация масштабных строительных работ (массовое движение грузовиков и тяжелой техники) в центре Лондона. Таким образом, создана специальная компания, которая сама ничего не строит и не проектирует, но существенно добавляет стоимость проекта за счет организации и координации.

2.1.5 Обобщение и анализ

Анализируя развитие технологий ОУП в течение последних лет (раздел 2.1.3) и новые формирующиеся тенденции (раздел 2.1.4) можно выделить следующие взаимосвязанные тренды:

- Все более усиливается процесс разделения «вещественной» и «интеллектуальной» частей производства. Происходит оформление «интеллектуальной части» производства как самостоятельной подотрасли – создание, модернизация и т.д. информационной модели (ИМ) продукта. Кроме роста числа компаний, бизнесом которых является инженерные услуги, это было и ранее, проявляются новые факторы: во-первых стандартизация инженерных услуг, и как следствие, «офшорные разработки», а во-вторых существенный рост стоимости «интеллектуальной части» производства/продукта по отношению к «вещественной», прежде всего из-за усложнения продуктов производства. Экономическое смещение акцента от вещественных объектов к интеллектуальным подкрепляет тренд выделения «интеллектуальной части» в самостоятельную подотрасль.
- «Интеллектуальная часть» продукта производства – информационная модель (ИМ) также институализируется и все более становится товаром. Полная ИМ включает информационные компоненты и маркетинга, и требований, и результатов проектирования/конструирования, и технологии изготовления, и сертификации, и логистики, и планов, и структуры кооперации разработчиков-изготовителей, и другие атрибуты. ИМ формируется, изменяется и используется на всех стадиях ЖЦ всеми участниками кооперации. ИМ создается в соответствии с методами и подходами, представленными в разделе 2.1.3. Роль ИМ повышается – она используется не только для изготовления продукта (например, как основа для конструкторско-технологической организации производства), но также для сертификации продуктов и других целей.
- «Вещественная часть» производства также существенно меняется: с одной стороны происходит специализация производителей компонентов сложных изделий/объектов/систем, с другой стороны сами изделия/объекты/системы все

больше и больше становятся продуктами интеграции «стандартных» серийно выпускаемых компонентов (или услуг).

- Происходит дальнейшая глобализация. Не только цепочки поставщиков становятся глобальными (например, уже сейчас Boeing более 50% компонентов получает от зарубежных поставщиков), но также процесс создания нового продукта – самая суть бизнеса – также становится глобальным.
- Предприятия – производители конечного продукта оставляют за собой создание информационной модели и физическую сборку компонентов продукта, а все остальное стараются передать участникам кооперации.
- Все эти изменения в существенной степени базируются на развитии соответствующих информационных технологий, причем ИТ не только поддерживают, но во многих случаях стимулируют изменения в технологиях ОУП.

Таким образом, дальнейшее развитие технологий ОУП (как методов, подходов, так и программных средств и регламентирующих документов) будет направлено на обеспечение следующих бизнес-возможностей:

1. Полноценного создания и манипулирования информационной моделью продукта на всем жизненном цикле продукта параллельно с манипулированием физически существующим продуктом, в том числе обеспечение изготовления, сертификации, модернизации продукта производства.
2. Специальных возможностей эффективного включения в ИМ продукта «стандартных» серийно выпускаемых компонентов (или услуг), а также компонентов других поставщиков.
3. Специальных возможностей манипулирования ИМ со стороны неквалифицированных пользователей (для обеспечения доступа массового заказчика и массовой кастомизации), в том числе с помощью нестандартных средств ввода-вывода информации.
4. Специальных возможностей использования в ИМ ранее разработанных технических решений, типовых решений, референтных решений (для облегчения сертификации, массовой кастомизации).
5. Обеспечение эффективного и унифицированного информационного интерфейса в формате полной ИМ между всеми производственными единицами, в том числе в логике интерфейса с производственным облаком.

Технологии ОУП связаны с научными исследованиями в области менеджмента и экономики, подготовкой кадров, с информационными технологиями.

Для развития современных технологий ОУП важны следующие условия:

- Расширенная подготовка кадров в области современных технологий ОУП.
- Создание и развитие теоретических моделей и методов современных технологий ОУП.
- Создание программного обеспечения (ПО), баз данных (БД) для поддержки современных технологий ОУП
- Создание ИТ основ коммуникационных инфраструктур с терабитовыми скоростями передачи информации; защиты компьютерных инфраструктур; перспективных средств и программных систем защиты данных; языков и систем программирования.

Для развития современных технологий ОУП и смежных сфер необходимо участие государства в создании организационно-правовой основы. Актуальными задачами являются:

- изменение законодательных актов, правил и стандартов, регламентирующих правовые отношения участников производства, в частности 94 ФЗ является серьезным препятствием к внедрению подходов PLM и концепции «расширенных предприятий»;
- формирование федеральных и региональных технологических кластеров и инженерных центров в области систем поддержки современных технологий ОУП;
- организация и оснащение федеральных центров коллективного пользования для поддержки исследовательских и опытно-конструкторских работ консорциумов и альянсов;
- формирование «Центров технологического превосходства» в сфере современных технологий ОУП;
- пересмотр действующих государственных программ исследований в области исследований и разработки современных технологий ОУП;
- включение современных технологий ОУП в интегрированные технологические цепочки.

К настоящему времени в ведущих странах на государственном уровне и в крупных корпорациях приняты стратегии перехода к использованию ППТ. Аналогичные

документы приняты в РФ на уровне государства («Стратегия инновационного развития РФ до 2020 года») и в крупных корпорациях (например, программы инновационного развития государственных корпораций и компаний с государственным участием). В данных программах отражены многие из областей ППТ, однако технологии ОУП практически не рассматриваются, да и в целом технологии ОУП не находятся в фокусе внимания ни государства, ни профессионального сообщества.

Видимо, это связано с тем, что роль этих технологий не осознана обществом. Действительно, технологии ОУП являются «мягкими», чисто организационными – они не требуют каких-либо капитальных вложений, не связаны с научными исследованиями в фундаментальных областях знаний (физика, химия и тд), поэтому не требуют видимых существенных затрат. Однако влияние на промышленность этих технологий весьма существенна: без них не будет ни качества, ни ритмичности производства, ни управляемой себестоимости. От того, что у каждого конструктора рабочее место будет оснащено самыми современными программными средствами САХ, а детали изделий будут изготавливаться только из композитов и порошков с использованием аддитивных технологий и в полностью автоматических цехах, проблемы с качеством (например, аварии с РН Протон), сроками и стоимостью (программа разработки БР Булава, строительство АЭС Нововоронеж-2) не будут решены.

Поэтому целесообразно выделить в стратегиях и программах развития промышленности направление технологий ОУП и осуществлять его финансирование.

Финансовая поддержка работ может осуществляться из разных источников, наиболее существенным, из которых остается финансирование проектов в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», ряда проектов ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Технологии ОУП являются «мягкой», организационной областью, поэтому барьеры внедрения соответствующие:

- законодательная база, в том числе техническое регулирование;
- разработанные и рекомендованные методики/инструкции/инструменты;
- образовательные программы для переподготовки существующих и подготовки новых кадров;
- инерционность кадров, привычки работать по старому, нежелание перестраиваться вообще, неприятие «прозрачных» процедур.

Вместе с тем все это также определяет и возможности внедрения современных технологий ОУП:

- отсутствие каких-либо капитальных затрат;
- соответственно минимальные сроки, необходимые для организационных изменений;
- существенное количество иностранных наработок в открытом доступе, которые нужно только адаптировать.

Параметры спроса: что и кому дает развитие этой области, на какие индустрии и/или их подотрасли влияет.

Технологии ОУП являются существенно важными для промышленности в целом и для всех ее индустрий без исключений, потому что именно технологии ОУП обеспечивают возможность создавать новые изделия в адекватные сроки и с гибким учетом потребностей клиентов, контролировать себестоимость, сроки и качество работ. Действительно, потребительские/функциональные свойства изделий обеспечиваются использованием новых материалов, технологий обработки и тд, но соблюдение сроков, качества и себестоимости зависят, прежде всего, от адекватного управления.

Роли заинтересованных сторон:

Промышленность

Промышленные фирмы являются заинтересованной стороной в развитии и внедрении технологии ОУП :

- отечественные компании, представляющие наукоемкий и высокотехнологичный сектор реальной экономики: промышленные и научно-внедренческие, консалтинговые и инжиниринговые фирмы (потенциальные заказчики работ, услуг и инженерных сервисов) потребители выпускников вузов, владеющих технологиями компьютерного инжиниринга мирового уровня, обладающих высокой квалификацией и ключевыми компетенциями;
- 47 Госкомпаний (акционерных обществ с государственным участием, государственных корпораций, федеральных государственных унитарных предприятий), разрабатывающих и реализующих программы инновационного развития (ПИР) в соответствии с перечнем, утвержденным Решением Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 3 августа 2010 г., протокол № 4 (по данным Информационно-коммуникационной площадки Минобрнауки России по состоянию на 31.12.2011 г. участниками ПИР

госкомпаний является 241 вуз), а также ОАО "РОСНАНО" и ОАО "Российская венчурная компания";

- предприятия, входящие в состав 27 технологических платформ, перечень которых утвержден Решением Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 1 апреля 2011 г., протокол № 2 (по данным Информационно-коммуникационной площадки Минобрнауки России по состоянию на 31.12.2011 г. участниками технологических платформ является 41 ВУЗ);
- Государственные научные центры (ГНЦ), Центральные и Специальные КБ (ЦКБ, СКБ), Центральные НИИ (ЦНИИ), НИИ, Научно-производственные объединения (НПО), ФГУП, Холдинги, Концерны и Корпорации;
- лидеры мировой промышленности (The World Industry Top, см., в первую очередь, Fortune Top500 Global List);

Промышленные предприятия могут выступать и как площадки для внедрения современных ОУП, так и в качестве разработчиков технологий, как самостоятельно, так и в составе альянсов и консорциумов друг с другом, с ВУЗами, академическими институтами или консалтинговыми фирмами.

Академия

Важную роль в успешном решении задач перехода на новые технологии ОУП могут играть организации Российской Академии наук, Российской академии архитектуры и строительных наук, Российского фонда фундаментальных исследований, национальных научно-исследовательских организаций и научные фондов, в том числе Некоммерческой организация Фонд развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий (Фонд "Сколково"), Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и др.).

Указанные организации могут являться непосредственными участниками выполнения фундаментальных и прикладных НИР и ОКР в области технологий ОУП. Институты РАН должны быть активными участниками в системе консорциумов между учреждениями РАН, университетами, промышленными корпорациями, зарубежными партнерами.

ВУЗы

ВУЗы также могут принимать участие в разработке современных технологий ОУП:

- технические университеты, математико-механические и физико-математические факультеты классических университетов;
- 40 членов Ассоциации ведущих университетов России, включающей 2 национальных университета, 29 НИУ и 9 Федеральных Университетов;
- 57 вузов, реализовавших Инновационные образовательные программы (ИОП) в рамках Приоритетного национального проекта "Образование" в 2006–2008 гг.;
- 55 вузов-победителей конкурса поддержки Программ стратегического развития университетов;
- а также около половины университетов, реализующих Постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 (77 вузов), 219 (56 вузов), 220 (26 вузов) и 132 члена Ассоциации технических университетов России.

Роль специалистов вузов связана с их участием в продвижении и развитии технологий ОУП, участии в решении задач кадровой поддержки новых технологий. В этой связи главной задачей университетского образования становится формирование у обучающегося ключевой компетенцией – способностью работы в большом (глобальном) масштабе.

Вузы России, должны обеспечить:

- перестройки квалификационных моделей бакалавров, специалистов, магистров и аспирантов;
- перестройки образовательного процесса с переходом на модель «образование через исследование»;
- научные исследования, связанные с развитием технологий ОУП.

Государство

Роль государства в развитии технологий ОУП определена государственной программой РФ "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности" 2012-2020 гг., указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 596 "О долгосрочной государственной экономической политике", нацеленных на поддержку трансформации технологической и структурной базы промышленности по четырем основным направлениям:

- переход индустрии к управлению жизненным циклом,

- переход проектирования и инжиниринга на основу программных технологий и компьютерного моделирования, использования производств и материалов нового поколения под конкретный продукт,
- развертывание промышленной инфраструктуры нового типа, так называемых "умных сред" (умные дороги, умные сети, умные производства).

Для реального развития и внедрения современных технологий ОУП со стороны государства необходима поддержка в изменении нормативной базы и стимулирование технологий ОУП через включение в программы стратегии развития, а также через постановку соответствующих целей развития перед руководителями крупных государственных промышленных корпораций.

Также Президент РФ, Правительство РФ, Президентский Совет по модернизации экономики и инновационному развитию РФ, Экспертный и Координационный Совет по технологическому и промышленному форсайту (на базе ЦСР «Северо-Запад»), Министерства (Министерства промышленности и торговли, Министерство образования и науки, Министерство экономического развития и др., Агентство стратегических инициатив), осуществляют организацию, мониторинг и контроль программ развития и обеспечения конкурентоспособных кадров, поэтому являются заинтересованными в развитии технологий ОУП.

Относительные масштабы влияния на такие параметры, как:

Современные технологии ОУП как было отмечено выше являются решающими факторами влияния на соблюдение ритмичности производства, плановых сроков и себестоимости, а также качества изделий и работ.

Многие из технологий ОУП также обеспечивают снижение сроков и себестоимости разработки новых изделий (управление требованиями, параллельное проектирование, интеграция данных, безбумажный документооборот).

Эффекты от внедрения технологий ОУП могут быть весьма существенными, например, по оценкам отчета [эфф] внедрение процедур ОУП приводит к снижению количества неуспешных проектов на 15%, снижению количества проектов с перерасходом бюджета на 10%, повышению производительности выполнения проектов на 10%, снижению трудозатрат на администрирование проектов на 25%.

Как следствие, внедрение современных технологий ОУП вызывает ускорение инноваций и повышение конкурентоспособности промышленности в целом.

2.1.6 Оценки перспектив для России

Текущий статус использования в России описанных выше (разделы 2.1.3 и 2.1.4) методов и подходов ОУП приведен в таблице 2.1 (ниже). Таблица 2.1 позволяет сделать вывод, что перспективные технологии ОУП в России находятся на самом начальном уровне, что показывает наличие резервов эффективности и создает значительные перспективы развития: эти технологии имеет смысл внедрять практически на всех промышленных предприятиях.

Таблица 2.1

Подходы и методы ОУП	Текущий статус
Системно-инженерные подходы: • Концепции PLM, полной стоимости жизненного цикла, управления сроками эксплуатации. • Управление требованиями, конфигурацией, изменениями, параллельное проектирование.	Процессы управления ЖЦ имеются на всех предприятиях (процессов не может не быть, иначе предприятия не могут работать), но на подавляющем большинстве предприятий процессы сложились стихийно и не являются эффективными. В отдельных случаях процессы стандартизированы и доведены до уровней, соответствующих международным практикам (или близки, или развиваются в этом направлении), например, в ЗАО «ГСС», ФГУП «ПО «Уральский оптикомеханический завод», ОАО «Автоваз». Не известно фактов использования концепции полезности или себестоимости на всем ЖЦ. На практике промышленные предприятия не имеют адекватных компетенций и систем учета себестоимости продукции. Естественно, на всех предприятиях себестоимость рассчитывается, но при этом не учитываются все необходимые факторы. Например, не учитываются затраты на проведенные для разработки продукта НИР, или производственные затраты внутри цехов (соответственно, и предприятия в целом) не разносятся на изделия / линии изделий. Проблема ценообразования в промышленности (фактически, производная от себестоимости) осознана и вынесена на уровень Правительства: учрежден и

	работает «Совет Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации по вопросам ценообразования и финансово-кредитной политики при выполнении государственного оборонного заказа». Известны отдельные попытки начать использовать подходы управления сроком эксплуатации капитальных объектов (Plant Life Management) на уровне разработки концепций (например, ОАО «ВНИИАЭС»).
Модульность, платформы, крупноблочная сборка и монтаж.	Платформы – используются, Крупноблочная сборка на уровне, применяемом Boeing или альянсом AWD – не используются.
Моделе- и дата-центричность	Практически на всех предприятиях первичным является чертеж с мокрой подписью, на отдельных предприятиях параллельно чертежам передаются в электронном виде ИМ изделий. В отдельных случаях общая ИМ изделия/объекта используется несколькими или даже всеми подразделениями предприятия (например, АЭП). Крайне редко ИМ используется также и смежными предприятиями (ЗАО «ГСС», ОАО «КАМАЗ»).
Управление проектными программами и проектами, EVM и IPD	Процессы управления проектами достаточно широко внедряются во всех индустриях. Как правило, в части календарного и ресурсного планирования. Стандартизированные и соответствующие международной практике процессы управления программами только начинают внедряться, например, в ОАО «Вертолеты России», ОАО «ОДК».
Расширенное предприятие, интеграция данных и процессов [interoperability].	Не известны факты реализации концепции «Расширенного предприятия». На отдельных предприятиях внедрены единые процессы с отдельными смежниками (ОАО «НИАЭП»). Интеграция инженерных данных практически

	отсутствует: • между организациями – известны единичные случаи передачи неполной электронной модели (ОКБ «Гидропресс» - АЭП). • между подразделениями внутри организации не является общей практикой, скорее как исключение (ЗАО «ГСС», АЭП, ОАО «НИАЭП», ОАО «КАМАЗ»).
Стандарты представления данных и информационного обмена OWL, STEP NC, ISO 15926.	Известны единичные случаи внедрения стандартов обмена данными (ОАО «НИАЭП»). По ISO 15926 ведутся отдельные работы тремя-пятью небольшими группами энтузиастов, крупные предприятия редко заказывают НИР в данной области (Проектно-конструкторский филиал концерна «Росэнергоатом»).
TQM, LEAN и другие.	LEAN – достаточно популярен, есть несколько консалт. фирм, реализовавших десятки проектов внедрения LEAN на промышленных предприятиях.
Безбумажный документооборот. Управление “on-line”.	Не известно фактов внедрения полномасштабного безбумажного документооборота в промышленности, ни организационно-распорядительного, ни технического; аналогично и электронных архивов проектно-конструкторской документации. Управление производством on-line редко реализовано в рамках отдельных цехов (например, ОАО «Пермская Научно-производственная Приборостроительная Компания»), о фактах внедрения такого управления в рамках всего предприятия или тем более кооперации – не известно.

Manufacturing intelligence, Industry 4.0, Smart Manufacturing.Global Product Development; Virtual Enterprise и альянсы; «Производство как сервис» и «облачное производство»; Инфраструктура «облачного производства» - Industrial Internet;	Не известно фактов участия промышленных предприятий в разработке или заказов НИР по данным направлениям.
Отделение и аккумуляирование не вещественных функций: маркетинг, концепт/требования, архитектура, кооперация, сертификация, продажи, сервис.	Не известно фактов аккумуляирования не вещественных функций «вдоль всего ЖЦ», в какой-то степени в этом направлении движется ЗАО «ГСС». Повсеместное отделение проектных институтов и/или КБ от заводов и других производственных предприятий (как историческое наследие) является выделением отдельных функций на определенном этапе ЖЦ («поперек», а не «вдоль ЖЦ»), что на практике создает барьеры между организациями и, таким образом, противоречит тренду.

В таблице 2.2 перечислены все организации, упомянутые в таблице 2.1, с указанием областей деятельности и веб-сайтов.

Таблица 2.2

ЗАО «ГСС»	Создание новых образцов авиационной техники гражданского назначения. Программа по созданию семейства российских региональных самолетов Sukhoi Superjet 100.	http://www.sukhoi.org/planes/projects/ssj100/
ФГУП «ПО «Уральский оптико-механический»	Приборостроение, точное машиностроение, оптико-механические приборы.	http://www.uomz.ru/

завод»		
ОАО «Автоваз»	Производство легковых автомобилей	http://www.avtovaz.ru/
ОАО «ВНИИАЭС»	Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы в области эксплуатации атомных электростанций.	www.vniiaes.ru/
ОАО «КАМАЗ»	Разработка, изготовление, сборка автотехники и автокомпонентов, сбыт готовой продукции и её сервисное сопровождение.	http://kamaz.net/ru
ОАО «Вертолеты России»	Разработка, производство и сервисное обслуживание вертолетов.	http://www.russianhelicopters.aero/ru/
ОАО «ОДК»	Производство двигателей для военной и гражданской авиации, космических программ, установок различной мощности для производства электрической и тепловой энергии, газоперекачивающих и корабельных газотурбинных агрегатов.	http://www.uk-odk.ru/rus/
ОАО «НИАЭП»	Проектирование и сооружение АЭС.	http://www.niaep.ru/
ОКБ «Гидропресс»	Конструкторские, расчетно-теоретические, экспериментально-исследовательские и производственные работы по созданию реакторных установок для АЭС.	http://www.gidropress.podolsk.ru/
ОАО «Атомэнергопроект»	Проектно-изыскательские работы по сооружению и модернизации АЭС.	http://www.aep.ru/
Проектно-конструкторский филиал концерна «Росэнергоатом»	Проектно-конструкторские работы в интересах обеспечения эксплуатации АЭС.	http://www.rosenergoatom.ru/
ОАО «Пермская Научно-производственная	Приборостроение, точное машиностроение, Производство датчиков, элементов, а также сложных бортовых комплексов навигационных систем различного назначения и товаров	http://www.ppk.perm.ru/

Приборостроительная Компания»	народного потребления.	
-------------------------------	------------------------	--

Основываясь на оценках [эфф] или [NIST] можно сказать, что внедрение перспективных технологий ОУП даст повышение эффективности производства в целом не менее чем на 15-25%.

За последние десятилетия на подавляющем большинстве Российских предприятий внедрено большое количество различных информационных систем (например, ERP-системы в различном составе внедрены практически на всех значимых предприятиях, также практически на всех рабочих местах проектировщиков и конструкторов большинства предприятий установлены САХ-системы и тд). Российские предприятия широко используют те же самые программные и технические средства, что и зарубежные предприятия. Большинство сегментов информационно-технологических рынков Российской федерации на 100% обеспечиваются поставками общемировых вендоров, например:

- CAD, CAM, CAE, PDM – платформы уровня крупного предприятия и другие;
- ERP-системы уровня средних и крупных предприятий;
- BI-системы;
- Системы управления документооборотом уровня крупного предприятия;
- Вычислительные системы уровня крупного предприятия;
- Высокопроизводительное сетевое оборудование.

Однако при внедрении информационных систем в подавляющем большинстве случаев на первое место ставились задачи внедрения ит-систем, а не технологий ОУП. Это и привело к ситуации почти тотального охвата рабочих мест современными информационно-технологическими средствами в сочетании с устаревшими и крайне неэффективными технологиями ОУП – сочетание современных эффективных инструментов и неадекватного их применения.

Поэтому внедрение современных технологий ОУП должно быть сфокусировано не столько на автоматизации рабочих мест путем внедрения еще дополнительных программных средств, но прежде всего на организационных изменениях – новых регламентах взаимодействия, информационном обмене и тд.

Внедрение технологий ОУП на конкретном предприятии или кооперации предприятий подразумевает следующие шаги:

- a. адаптацию методик и подходов ОУП к специфике предприятия и производственного контекста, окружающего предприятие;
- b. создание новых моделей производственных и бизнес-процессов, реализующих новые технологии ОУП;
- c. на основе моделей - разработку регламентов и инструкций для сотрудников, а также требований к информационным системам, поддерживающим новые производственные и бизнес-процессы;
- d. реализацию требований к информационным системам включая модернизацию существующих систем, внедрение новых, интеграцию и тд;
- e. обучение сотрудников работе в рамках новых производственных и бизнес-процессов.

2.1.7 Список литературы

[Ind4.0] - Project of the Future: Industry 4.0, Ministry of Education and Research, Germany, <http://www.bmbf.de/en/19955.php>

[SM] – SMLC Forum: Priorities, Infrastructure, and Collaboration for Implementation of Smart Manufacturing, Workshop Summary Report held in Washington, D.C. on October, 2012.

[DoD] – DEFENSE ACQUISITION GUIDEBOOK, <https://dag.dau.mil>

[INCOSE_Hb] - INCOSE Systems Engineering Handbook v. 3.2. INCOSE-TP-2003-002-03.2. January 2010

[CIMData] –PLM-definition

[15288] – ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 «СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ. ПРОЦЕССЫ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ»

[TCM] - Total Cost Management Framework. AACER® International. 2012, CreateSpace

[PLf] – МАГАТЭ Plant life mngt

[29148] – INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC/IEEE 29148 First edition 2011-12-01 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering

[10007] – ГОСТ. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ КОНФИГУРАЦИЕЙ ISO 10007:2003

[CMII] - CMII-105C CMII Standard for Product Configuration Management. ©CMII Research Institute 1986 – 2010

[PMI] – Project Management Institute, <http://www.pmi.org/>

[EVM] – Basic Concepts of Earned Value Management (EVM), <https://www.humphreys-assoc.com/evms/basic-concepts-earned-value-management-evm-ta-a-74.html>

[IPD] – Integrated Project Delivery: A Guide. The American Institute of Architects. <http://www.aia.org/contractdocs/aias077630>

[interoperability] – Advancing Interoperability for the Capital Projects Industry: A Vision Paper. FIATECH, February 2012.

[OWL] – OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition) W3C Recommendation 11 December 2012 <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/>

[14649] - ISO 14649-1 (2003). Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for computerized numerical controllers -- Part 1: Overview and fundamental principles. Geneva: International Organization for Standardization.

[10303] - ISO 10303-238 (2007). Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 238: Application protocol: Application interpreted model for computerized numerical controllers. Geneva: International Organization for Standardization.

[15926] – An Introduction to ISO 15926. FIATECH, November 2011.

[LEAN] – Вумек Джеймс П., Джонс Даниел Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. — М.,: «Альпина Паблишер», 2011, ISBN 978-5-9614-1654-1

[Ind4.0] - Project of the Future: Industry 4.0, Ministry of Education and Research, Germany, <http://www.bmbf.de/en/19955.php>

[SM] – SMLC Forum: Priorities, Infrastructure, and Collaboration for Implementation of Smart Manufacturing, Workshop Summary Report held in Washington, D.C. on October, 2012.

[MC] – ManuCloud: The next-generation Manufacturing as a service (MaaS) environment. <http://www.manucloud-project.eu/index.php?id=233>

[NNMI] – National Network for Manufacturing Innovation (NNMI), <http://manufacturing.gov/nnmi.html>

- [NCDMM] – National Center for Defense Manufacturing and Machining, <http://ncdmm.org>
- [ALMMII] – American Lightweight Materials Manufacturing Innovation Institute (ALMMII), <http://almmii.org>
- [GPD] – Global Product Development. A PTC Solution. August 2014 CIMdata, Inc.
- [BIVÉE] - Business Innovation in Virtual Enterprise Environments. <http://bivee.eu/the-project/>
- [HCAWD] - WHY AN ALLIANCE? Air Warfare Destroyer Alliance. <http://www.ausawd.com/content.aspx?p=98>
- [MaaS] - Manufacturing-as-a-Service: Are We There Yet? Almost. Stephanie Neil ©2014 Manufacturing Transformation Blog, <http://www.aprison.com/blog/2013/06/manufacturing-as-a-service-are-we-there-yet-almost/>
- [IndInt-1] – The Industrial Internet. Tom Bullinger. May 16, 2013, INCOSE
- [IndInt-2] - Industrial Internet by Jon Bruner 2013 O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472 USA
- [MDA] - OPTIMIZATION OF MACHINE INTEGRATION. Supported by ODVA, OPC Foundation and Sercos International. ©2011-2012 ODVA, Inc.
- [MF] - Manufacturing Future with MTConnect + Google Glass + iBlue. TechSolve, Inc. Amit Deshpande, IMTS 2014 Conference, September 8, 2014, Chicago, US.
- [cc iPhone] - Подсчитана себестоимость iPhone 5c и iPhone 5s. <http://hi-tech.mail.ru/news/iphone-5c-5s-cost.html>
- [CrossRail] – <http://www.crossrail.co.uk/benefits/crossrail-in-numbers>
- [эфф] - Craig Symons, Tim DeGennaro and Margo Visitacion. The ROI Of Project Portfolio Management Tools. A Total Economic Impact™ (TEI) Analysis Uncovers Significant Benefits. © 2009, Forrester Research, Inc. <https://www.forrester.com/Program-&-Project-Management/research?sort=3&range=504005&N=10001%2020234&access=0&page=3>
- [NIST] - NIST, “Cost analysis of inadequate interoperability in the US capital facilities industry” (2004).

2.2 Компьютерные технологии для моделирования и производства изделий

2.2.1 Определения и сокращения

В этом разделе, будут использованы принятые в профессиональной среде англоязычные сокращения:

CAD: Computer-Aided Design: в широком смысле, использование компьютерных технологий для создания, анализа и модификаций дизайна продуктов; в более узком смысле, прежде всего, создание

CAE: Computer-Aided Engineering: использования компьютерных технологий для инженерного анализа (механического, термодинамического и т.п.)

CAM: Computer-Aided Manufacturing: управление производственным оборудованием с помощью программных средств

CAx: Сокращение CAD/CAE/CAM/CAPP

PLM: Product Lifecycle Management: бизнес-подход по поддержке совместного создания, распространения и использования данных об изделии/объекте в течение всего жизненного цикла от концепции до вывода из эксплуатации и утилизации. Подход объединяет людей, процессы информационные системы и данные.

PDM: Product Data Management: использование компьютерных технологий для управления данными о конкретном продукте/объекте: проектная документация, производственные спецификации, необходимые материалы и так далее

MCAD: Mechanical Computer-Aided Design: CAD для разработки механических компонентов продуктов,

AEC CAD: Architecture, Engineering, Construction: CAD для архитектуры и строительства

BIM: Building Information Modeling: информационное моделирование зданий

EDA: Electronic Design Automation: средства проектирования электроники

2.2.2 Мотивация

Системы CAD (Computer-Aided Design) и CAE (Computer-Aided Engineering) в настоящее время являются одним из основных способов проектирования продуктов, в особенности сложных и высокотехнологичных, для которых компьютерный дизайн практически является единственным способом разработки.

Например, современные микросхемы с миллиардами транзисторов, были бы невозможны без развития в 1970-80-х годах компьютерных средств проектирования,

моделирования, оптимизации и тестирования, которые, в свою очередь, основаны на прогрессе фундаментальных алгоритмических исследований в нескольких областях.

Системы для дизайна механических систем (MCAD) , по сравнению с системами проектирования СБИС, должны поддерживать разработку намного более разнообразных изделий, с помощью разнообразных технологий. Еще более существенной является проблема разработки систем для «мультидисциплинарного» проектирования, позволяющие создавать, анализировать и оптимизировать системы с электрическими, механическими и другими элементами в едином контексте, и включать их в PLM-системы.

Несмотря на длительную историю развития, по данным компании Business Advantage, уровень внедрения даже базисных технологий CAD (трехмерное моделирование), далек от 100%, и лишь 28% участников опроса используют моделирование, включающее в себя средства CAE (выборка 409 компаний-пользователей технологий CAD, распределенных по различным регионам и областям деятельности).

Дальнейшее развитие и необходимость принципиально новых подходов к САХ в современных условиях обуславливается несколькими факторами:

1. Индивидуализация и повышение скорости разработки новых продуктов и новых версий продуктов требует ускорения цикла дизайн-тестирование, что возможно только за счет значительного расширения роли компьютерного моделирования. Ускорение цикла создает возможности для изготовления и тестирования прототипов продуктов, и горизонтальной и вертикальной интеграции различных средств CAD/CAM/CAE.

Current Trends Snapshot – Awareness/Usage

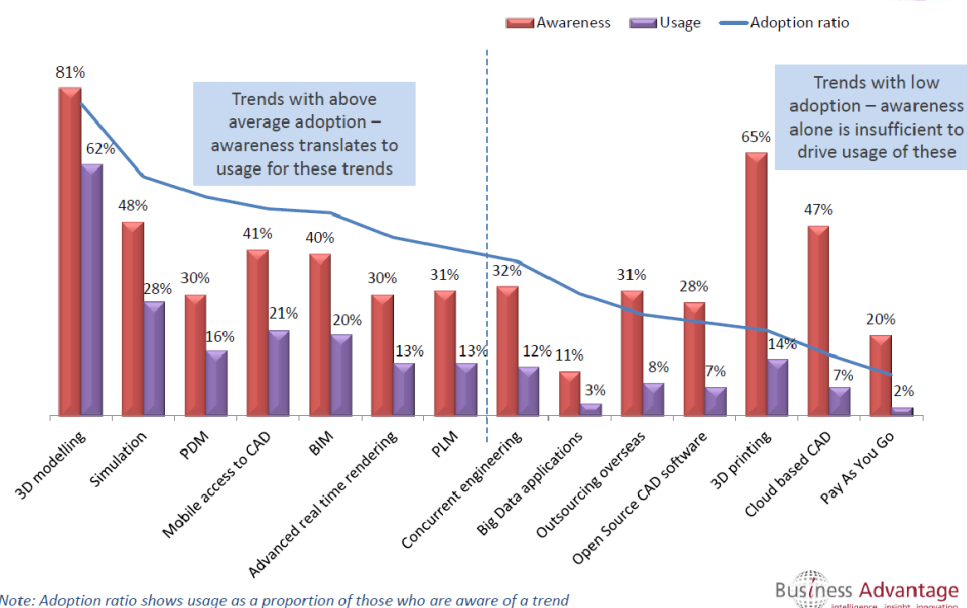


Рис. 1. Источник: компания Business Advantage [1]

2. Распределенное производство и повышение гибкости производственных цепочек требует

- существенного расширения количества работников с компетенциями в области компьютерного дизайна, что возможно только при «демократизации» существующих систем, с точки зрения необходимого специализированной уровня подготовки пользователей
- поддержки на всех этапах разработки продуктов, удаленного совместного дизайна.

3. Необходимость адаптации к новым технологиям (в частности, аддитивным технологиям и технологиям с использованием современных материалов).

Мы рассматриваем, прежде всего, средства MCAD, наиболее близко связанные с производственными технологиями, исключая программное обеспечение АЕС (архитектуры и строительства) и, в основном, EDA. Хотя дизайн электронных компонент и абсолютно необходим для развития инновационных продуктов, эта большая область обычно рассматривается отдельно.

2.2.3 Основные технологии CAD и CAE

Для обсуждения текущего состояния области и перспектив ее развития мы начнем с краткого обзора основных технологий.

Системы трехмерного геометрического моделирования (3D Computer Aided-Design).

Многие ранние системы CAD (например, компании Autodesk) прежде всего, переводили на компьютерную основу традиционные процессы проектирования, основанные, прежде всего, на двумерных чертежах, но довольно быстро практически все ведущие системы перешли к работе прежде всего, с 3-х мерными моделями изделий, из которых можно было сгенерировать двумерные проекции для производственной документации. Основная задача систем 3D CAD - предоставить пользователю возможность определения и последующей модификации геометрической формы частей изделия, но не их физических свойств или процесса изготовления. В основе всех систем геометрического моделирования лежит относительно небольшое количество стандартных подходов к компьютерному представлению 3-х мерных объектов:

Твердотельная геометрия (Solid geometry): представление объектов, как результата операций (пересечение, объединение, разность) над элементарными объектами (цилиндры, сферы, параллелепипеды и т.п.)

Граничные представления (Boundary representations):, включающие в себя топологическую информацию (как простые части поверхности связаны друг с другом, например, соседние грани куба имеют общее ребро) и геометрическую (форма каждой части поверхности; например, каждая грань куба - квадрат). Основным средством описания геометрии в промышленных приложениях являются сплайны, более конкретно, trimmed NURBS (trimmed Non-uniform Rational B-Splines), практически являющиеся промышленным стандартом. В определенных нишах (концептуальный дизайн, создание моделей для приложений в промышленности развлечений и тренажерах), популярны т.н. «поверхности подразделения» (subdivision surfaces) и прямое использование сеток (polygonal meshes).

Параметрическое моделирование. Важно разделять параметрическое представление геометрических объектов, и подход к их построению. В параметрическом представлении формы образованы из *конструктивных элементов (features)* с параметрами (например, размерами). Конструктивные элементы могут быть как формами (например, поверхности вращения), так и их модификациями (например, добавление скруглений определенного радиуса). Параметры разных элементов связаны друг с другом: например, радиус отверстия в цилиндре может быть задан как четверть его радиуса. Этот подход позволяет изменять твердотельные модели не нарушая их целостности. Наиболее распространенный вариант структуры параметрических моделей -- на базе предыстории, при котором параметры элементов добавленных позже зависят только от параметров ранее созданных

элементов. Более продвинутый тип моделей, *вариационные модели (variational model)* позволяет определять произвольный набор соотношений параметров, не заботясь о порядке создания, но требует более сложных вычислений при изменениях параметров, с использованием *геометрических решателей (geometric solver)*.

Прямое моделирование (direct modeling). Подход к геометрическому моделированию, при котором пользователь может непосредственно менять элементы граничного представления (скажем, передвинуть или изменить размер грани параллелепипеда), вместо изменения параметров конструктивных элементов, как при традиционном параметрическом моделировании. При этом прямое моделирование может сочетаться с параметрическим представлением геометрических данных.

Системы инженерного анализа (CAE). После разработки геометрических моделей, можно либо на прямую переходить к созданию испытанию физических прототипов, либо пройти стадии компьютерного анализа и оптимизации, для уменьшения количества итераций, требующих изготовления прототипов, в процессе разработки окончательного дизайна. Компьютерный анализ - наиболее наукоемкая часть CAD/CAE/CAM, т.к. он требует точного моделирования физических процессов и функционирования изделий.

Современные системы анализа позволяют моделировать широкий диапазон физических процессов, наиболее распространены следующие типы моделирования:

Анализ механических свойств (structural analysis): расчет эластических и пластических деформаций, как статических, так и динамических, прочности, анализ колебаний, механической устойчивости. Этот тип моделирования наиболее распространен и широко применяется для всех типов материалов: металл, пластик, композитные материалы и т.д.

Моделирование динамики систем твердых тел (Rigid Body Dynamics). Симулирование сложных механических систем с большим количеством движущихся элементов (например, манипуляторов промышленных роботов и поточных линий) методами, учитывающими деформации отдельных частей, требует дорогостоящих и долгих вычислений, и часто не является необходимым. Системы моделирования динамики абсолютно твердых тел основаны на специализированных высокоэффективных методах моделирования, предполагающих отсутствие деформаций. Такие системы позволяют моделировать сложные системы с большим количеством малодеформируемых движущихся частей.

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD): расчет потоков жидкости и газа (нпр., в двигателе или вокруг самолета). Наиболее существенную роль играет при проектировании авиационной техники, в автомобильной промышленности и кораблестроении, но также используется, по мере повышения доступности, во многих других областях.

Тепловой анализ (thermal analysis): анализ распределений температуры в различных условиях теплообмена, с процессами диффузии, конвекции и излучения. Т.к. теплообмен часто тесно связан с механическими нагрузками, современные системы теплового анализа, как правило, интегрированы с системами анализа механических свойств. С другой стороны, при наличии потоков жидкости или газа, процессы теплообмена моделируются одновременно с потоками. Наиболее важную роль этот вид анализа играет при проектировании двигателей, самолетов и кораблей, ракетной техники, энергетических генераторов, охладителей.

Электромагнитное моделирование (Electromagnetic simulation): численное моделирование статических и динамических электромагнитных полей. Этот класс технологий моделирования необходим для разработки СБИС, печатных плат, электромеханических систем и телекоммуникационных устройств. В целом, рынок средств EDA (Electronic Design Automation) обычно рассматривается отдельно от более общего рынка CAD, но в ряде важных приложений (в частности, проектирование электромеханических систем, анализ распределений температуры, связанных с электрическими цепями) существует потребность в интегрированных системах.

Моделирование процессов (Process Simulation): физическое и кинематическое моделирование конкретных процессов, таких как литье и штамповка.

Оптимизация (Optimization): Конечной целью дизайна является нахождение компромисса между различными требованиями к продукту, при минимизации затрат на изготовление, эксплуатацию и обслуживание. Средства автоматической оптимизации, в том числе многокритериальной и многодисциплинарной оптимизации, интегрированные со средствами моделирования, ускоряют и упрощают этот процесс, по сравнению с ручной оптимизацией путем изменения отдельных параметров системы.

Системное проектирование на основе моделей (Model-Based Systems Engineering). INCOSE определяет MBSE как формализованное применение моделирования для поддержки системно-инженерных процессов – управления требованиями, дизайна, анализа, верификации и валидации систем начиная с концептуального дизайна, и до

поздних стадий жизненного цикла системы. С точки зрения средств CAD/CAE, поддержка MBSE обычно связана с интеграцией геометрии и физического моделирования со средствами архитектурного описания и моделирования структуры систем.

Значительная доля средств CAE, за исключением моделирования работы механизмов, и потоков жидкости и электрических полей, основаны на *методе конечных элементов*, математическом подходе к моделированию физических процессов и решении больших линейных и нелинейных систем алгебраических уравнений. В деталях научные основания CAD и CAE рассмотрены ниже.

2.2.4 Ведущие международные производители CAD и CAE - систем; тенденции развития

В настоящее время, разработка систем CAD/CAE сконцентрирована в небольшом количестве крупных компаний, которые за последние 10-15 лет постепенно образовались путем поглощения конкурентов. «Большая четверка» компаний включает в себя, в порядке убывания объемов продаж за 2012 г, в долларах:

- Dassault Systemes (France/USA): 2614.0 млн.
- Autodesk (USA): 2312.2 млн.
- Siemens PLM (Germany/USA): 1768.4 млн.
- PTC (USA): 1257.2 млн.

Каждая из этих компаний в настоящее время, путем разработки новых продуктов и поглощения других компаний, имеет полную линейку продуктов для CAD, CAE and PDM, поддерживающих PLM-концепцию. Три ведущих компании специализирующиеся в основном на CAE включают:

- ANSYS (USA) 798 млн.
- Altair Engineering (USA) 240 млн.
- MSC (USA) 188.6 млн.

Отдельно стоит отметить компанию Mathworks (объем продаж 760 млн.) производителя популярной среды для численных расчетов MATLAB и среды моделирования сложных динамических систем Simulink. Продукты компании играют большую роль в инженерных приложениях, но используются, скорее, как инструмент быстрого создания собственных разработок внутри компаний, чем для прямого решения конкретных инженерных задач.

Состояние дел в САМ, в отличие от PLM/CAD/CAE, отличается отсутствием консолидации (хотя в 2013 началась попытка консолидации в Европе), и существенной раздробленностью. Этот сектор тесно связан с производством оборудования и не рассматривается в этом разделе в деталях.

Необходимо отметить, что многочисленные компании среднего и малого размера продолжают играть критическую роль в области, несмотря на доминирование крупных компаний на рынке: значительная доля инновационных продуктов и компонент продолжает создаваться в таких компаниях, часто поглощаемых более крупными.

Крупные компании в области CAD: линейки продуктов и тенденции в развитии

Хотя каждая из ведущих компаний среди перечисленных имеет продукты во всех основных категориях CAD и CAE, их стратегии развития существенно различаются. Анализ недавних приобретений и новых продуктов этих компаний хорошо отражает современное состояние области и текущие тенденции развития в целом.

Dassault Systemes

Dassault Systemes является крупнейшей компанией на рынке. Линейка продуктов Dassault включает несколько основных групп: основные группы: CATIA (CAD продвинутого уровня), ENOVIA (PDM), и две группы, которые можно отнести к CAE: SIMULIA (набор пакетов для механического, теплового анализа и гидродинамики) и DELMIA (планирование и моделирование производственных процессов в масштабах предприятия). В дополнение, относительно недавно были созданы группы продуктов 3DVIA (визуализация и удаленное сотрудничество), и недавно добавленные GEOVIA (CAD для проектирования добычи полезных ископаемых) и BIOVIA (PDM и моделирование молекулярного уровня для биомедицинских и химических компаний). В дополнение к основной линии CATIA/ENOVIA/DELMIA/SIMULIA, компания Dassault Systemes поддерживает линию продуктов SolidWorks, ориентированную на средние и малые предприятия.

Ключевой продукт фирмы – система трехмерного проектирования CATIA, полностью, за исключением геометрического ядра, разработанная самой компанией. Поддержание и разработку геометрического ядра ведет дочерняя компания Spatial, приобретенная в 2000 году.

Хотя компания никогда не прекращала совершенствование основного продукта, в настоящее время он достиг относительно стабильного состояния; последние изменения в этой области, как и у многих других производителей, связаны с повышением

Приоритеты и тенденции развития. В настоящее время, основа маркетинга продуктов Dassault Systemes -- идея 3DEXPERIENCE, которая сама компания не определяет в технических терминах. Наиболее заметные компоненты 3DEXPERIENCE – расширение идеи product lifecycle management, интеграция средств поддержки маркетинга и взаимодействия с потребителями на всех этапах разработки продуктов. Другое описание 3DEXPERIENCE -- изучения всех процессов клиента и разработка решений, нацеленных на поддержку полную поддержку этих процессов.

К развитию в этой области относится приобретение компании Netwibes в 2012 году, разрабатывающей средства мониторинга и анализа социальных сетей, и компании RTT в 2014, производителя программного обеспечения для генерации изображений и видео высокого качества, ориентированных на маркетинг (продукт 3DEXCITE). Однако значительная доля развития Dassault продолжает оставаться в рамках CAD/CAE, которым посвящен этот раздел. По скорости роста доходов, продукты CAE (SIMULIA и DELMIA) лидировали, с ростом 25% в 2012 году, хотя по абсолютным цифрам CAD высокого уровня (CATIA)

Развитие средств CAD/CAE может быть разделено на два основных направления:

Создание новых направлений, расширяющих клиентскую базу Dassault Systemes, и требующую принципиально новых подходов: продукты GEOVIA (2012), основанный на продуктах приобретенной в 2012 компании Gemcom, специализирующейся на проектировании для добычи полезных ископаемых, и BIOVIA (на основе Accelrys), системы PLM и моделирования для высокотехнологичных компаний, ведущих разработки в областях химических и биологических технологий.

Расширение диапазона средств CAE, в контексте групп продуктов CATIA и SIMULIA. Два основных вектора развития – специализированные системы для конкретных производственных процессов, и средства оптимизации. В 2011 приобретена компания Simulayt (проектирование и анализ изделий из композитных материалов), в 2013 Simproe (литье изделий из пластика) и Safe Technology (моделирование усталости материалов). В области оптимизации, предложения Dassault основаны на разработках немецкой компании FE Design (Tosca). Первая тенденция также присутствует в продуктах Solidworks, ориентированных на

средний и малый бизнес: в последние годы расширены средства для проектирования литья из пластмассы, штамповки металла и электрической разводки.

Также следует отметить, что развитие средств для удаленной совместной работы над продуктами уже долгое время является одним из приоритетов Dassault Systemes, как и поддержка модели-ориентированных системно-инженерных процессов, прежде всего, Dymola. Можно ожидать дальнейшего развития программных средств для системной инженерии.

Autodesk

По структуре своей линейки продуктов, Autodesk продолжает существенно отличаться от других компаний в ведущей группе, хотя в результате недавних приобретений и наблюдается определенная конвергенция.

Пользовательская база Autodesk значительно шире, чем у других компаний «большой четверки», благодаря более крайне разнообразному набору продуктов, доступным ценам на многие из них, и ориентацией не только на профессионалов, но и на широкого пользователя. Значительная доля продуктов Autodesk ориентирована на пользователей в индустрии СМИ и развлечений (компьютерная мультипликация, специальные эффекты для кинематографа, 3D визуализация для маркетинга и информации, компьютерные игры и т.д.). С приобретением компании Alias, компания Autodesk владеет двумя наиболее распространенными продуктами высокого уровня в этой области, Maya и 3D Studio Max. Хотя основные подходы к геометрическому физическому моделированию в этих системах и системах CAD сходны, приоритеты в развитии этих систем существенно отличаются. По мере изменения потребностей в области промышленного CAD, можно ожидать, что многие технологии, созданные для нужд индустрии СМИ и развлечений, будут находить все большее применение в новых промышленных приложениях, как мы обсудим ниже.

Исключая продукты для сегмента АЕС, СМИ и индустрии развлечений, и непрофессиональных потребителей (по количеству, хотя и не по доходности, эти продукты составляют большинство), основные CAD/CAE продукты Autodesk. Из этой группы продуктов отметим небольшой бесплатный продукт Meshmixer для непрофессиональных пользователей, в рамках которого ведутся разработки по поддержке аддитивных технологий.

Из «большой четверки» у Autodesk традиционно была наиболее ограниченная поддержка PLM-концепции (ограниченная функциональность PDM-продукта Autodesk Vault).

Наиболее известный продукт -- это AutoCAD, самый распространенный пакет CAD в мире, используемый для значительного количества приложений в разных областях, и поддерживающий работу как в 2D, так и в 3D. Существует набор специализированных вертикальных приложений на основе AutoCAD: например, Architecture, Civil 3D, Electrical, Mechanical, Plant 3D и т.п. Продукт Autodesk Inventor, система параметрического моделирования в 3D, нацелена на сходный диапазон потребителей по цене (обе программы, скорее, Solidworks, чем CATIA, по сравнению с продуктами Dassault).

В области CAE, основными являются группы программ Autodesk Simulation (Mechanical, CFD, Composite Analysis, Composite Design, Flow Design), и Autodesk Nastran. Также внимания заслуживают продукты Alias Studio – примеры продуктов, для рынка CAD (например, проектирования высококачественных поверхностей для автомобилестроения), конкурентные преимущества которых связаны с их корнями в продуктах для индустрии развлечений.

Относительно недавно появился комплекс облачных продуктов 360, подробнее рассмотренный ниже. Также стоит отметить продукт ReCap, для создания 3D моделей из изображений, и его облачный аналог 360.

Приоритеты и тенденции развития. Можно идентифицировать два основных направления: облачные системы, и расширение поддержки моделирования.

Облачные системы. Наиболее заметные инновации компании связаны с системой облачных продуктов 360, быстро развивающейся в последние два года. Развитие этой группы продуктов тесно связано с идеей «демократизации» дизайна, т.е. повышение доступности средств CAD/CAE как по цене, так и по требуемому уровню подготовки пользователей [2]. CEO Autodesk Карл Басс в интервью engineering.com характеризовал общую идею облачных систем Autodesk следующим образом: “Речь идет о том чтобы повысить производительность... мы видим два важных преимущества облачных приложений: бесконечно масштабируемые вычислительные ресурсы, которые всегда предоставляют необходимую вычислительную мощность [для конкретной задачи]. С другой стороны, [облако –] это естественная платформа для совместной работы.

Практически нет проектов, не включающих в себя многих людей или фирм. Мы предоставляем инструменты, необходимые для координации и сотрудничества» [3].

Линия продуктов 360, включающая в себя средства CAD (AutoCAD 360, Fusion 360), PLM (PLM 360), инженерных вычислений (Sim 360) и (что необычно для «большой четверки») CAM (CAM 360), т.е., в принципе покрывает все основные категории продуктов. Однако их возможности на данный момент существенно ограничены, по сравнению с такими же+ системами того же направления, скажем от Dassault или самого AutoCAD [4].

Расширение поддержки моделирования. Анализ недавних приобретений компании Autodesk показывает, что развитие возможностей компании в области CAE также является существенным приоритетом, хотя сама компания прежде всего, обсуждает CAE в контексте облачных приложений. Исключая приобретения в области индустрии развлечений, наиболее существенными недавние приобретениями являются: Blue Ridge Numerics (2011, вычислительная гидродинамика), Firehole Technologies (2013, композитные материалы), и, наиболее существенно, компанию NEI Software в 2014, одной из ведущих компаний в области CAE (например, продукт NEI Nastran), который существенно приблизил Autodesk к лидерам области CAE по уровню продуктов. Среди других важных приобретений – Delcam (2013), один из крупных производителей систем для CAM.

После недавних приобретений линейка продуктов Autodesk стала намного ближе к предложениям других компаний большой тройки, несмотря на общую ориентацию компании на средний и мелкий бизнес и массового потребителя.

Siemens PLM Software

Siemens PLM, базирующаяся в США, в отличие от остальных крупнейших CAD компаний, является подразделением крупнейшей немецкой компании Siemens (валовой доход -- 86.3 миллиардов евро). Компания, как видно из названия, ставит PLM в центр своих приоритетов. Исторически, она образовалась путем сложной цепи приобретений и слияний, с основными группами продуктов основанных на разработках в прошлом независимых компаний UGS/Unigraphics, SDRC, и технологии, приобретенной у MSC.

Основные продукты компании в области CAD/CAE (исключая PLM): линия продуктов NX включающая продукты по всем основным направлениям, по уровню и ориентированности на крупных клиентов сходная с группами продуктов CATIA/SIMULIA Dassault Systemes. Продукты бренда SolideEdge, со схожей, но более ограниченной

функциональностью ориентированы на бизнес среднего уровня. Отдельные линии продуктов преимущественно связаны с CAE: Femap - создание и автоматическая генерация сеток, интерфейс с решателями и CAD), LMS Imagine.Lab/AMESim – системное проектирование и механотроника, LMS Virtual.Lab и Samtech– моделирование механизмов и прочности. Продукты Fibersim предназначены для проектирования и моделирования изделий из композитов. Siemens PLM лицензирует значительный набор программных компонент другим производителям программного обеспечения, в частности, геометрическое ядро Parasolid и геометрический решатель D-Cubed.

Приоритеты и тенденции развития. В отличие от компаний Dassault Systemes и Autodesk, компания Siemens PLM не декларировала в последние годы существенных изменений курса. Чак Гридстафф, президент компании, сказал в интервью portalу engineering.com : “Для нас вопрос не в нахождении [и включение в наши продукты] последней модной технологической новинки. Скорее, какое место эти технологий в производственных процессах наших клиентов, как они позволят нашим клиентам получить дополнительные преимущества. Возможно кое-что [из того, что мы делаем] выглядит как постепенные улучшения – пусть так. Мы не гоняемся за яркими, но кратковременными новациями (we are not a “flash-in-the-pan” kind of company).”[5] Среди текущих направлений развития компании он упомянул поддержку системно-инженерных процессов, в контексте приобретения LMS, интеграцию дизайна и производства, и в, качестве более общей идеи средства поддержки “science of the product”, моделирования всех аспектов продукта. Интересной особенностью продуктов Siemens PLM является приоритет много-платформенных и multi-CAD систем, поддерживающих не только импорт из конкурирующих систем CAD, но и интеграцию со системами других компаний, например, интеграцию CATIA с PDM-продуктом Teamcenter, и программа JT Open.

Приобретения Siemens PLM за последние несколько лет – практически все из области PLM и CAE, в частности, одно из самых крупных приобретений – компания LMS; в сочетании с продуктами линии NX Nastran, приобретение LMS вывело Siemens PLM на третье место среди компаний CAE по продажам, значительно укрепив их положение: по расчетам С. Павлова [6] близко к Dassault Systemes. Другое приобретение – компания Vistagy (2011, дизайн и моделирование изделий из композитных материалов).

Последняя компания «большой четверки» существенным образом уступает остальным трем по объему продаж. Исторически, компания PTC разработала концепцию параметрического моделирования, которая была, долгое время, основной для всех ведущих компаний. В настоящее время, как и другие компании «большой четверки» компания

Основные продукты PTC в области CAD/CAE консолидированы под брендом Creo: Creo Parametric, Creo Direct, Options Modeler (3D CAD), Creo Sketch and Layout (2D CAD), Creo Simulation (CAE, механическое и термальное моделирование) и Simulation Extensions (advanced simulation, mechanism dynamics, spark analysis, fatigue and plastic), визуализация (Creo View, Illustrate).

В области PLM, основной продукт PTC -- PTC Windchill, в областях текущих приоритетов SLM (service lifecycle management) и ALM (application lifecycle management) Servigistics и Integrity. PTC также поддерживает систему интерактивных инженерных вычислений MathCad, сходную с Matlab и Maple по функциональности, но в целом уступающую им по возможностям.

Приоритеты и тенденции развития. Основная идея компании – агрессивное развитие концепции PLM в области услуг Service Lifecycle Management, и в области поддержки программного обеспечения, связанного с продуктами (Application Lifecycle Management). По словам Джима Брауна, президента Tech-Clarity (компании по изучению рынка), «[PTC] рассматривает “servitization” (размывание границы между продуктом и [связанными с ним] услугами как критическую переменную в производстве, и стремится поддерживать эти переменные своими продуктами.» «Они видят, что разработка программного обеспечения для «умных» продуктов является задачей, которую приходится решать их клиентам, и хотят, чтобы у них было решение соответствующее решение» [7].

Практически все недавние приобретения компании PTC -- в области PLM, SLM и ALM (Servigistics, Enigma, Atego), что согласуется с заявленным компанией приоритетами. Приобретение компании Atego, в частности, производящей программное обеспечение для поддержке модели-ориентированной системной инженерии, показывает, что PTC также стала придавать большое значение этой области. Заметим, что это также единственная компания, относительно мало уделяющая внимания развитию CAE: по оценкам С. Павлова основанных на данных компании CIMData [6] PTC не входит даже в 10 лидирующих компаний в этой области.

Ведущие специализированные компании CAE

Хотя в целом область CAD/CAE достигла крайне высокой степени консолидации, и компании предлагающие решения для многих сегментов рынка и большинства аспектов PLM доминируют, области CAE (см. рис.2) есть несколько специализированных компаний, играющих крайне важную роль, в особенности, компания ANSYS.

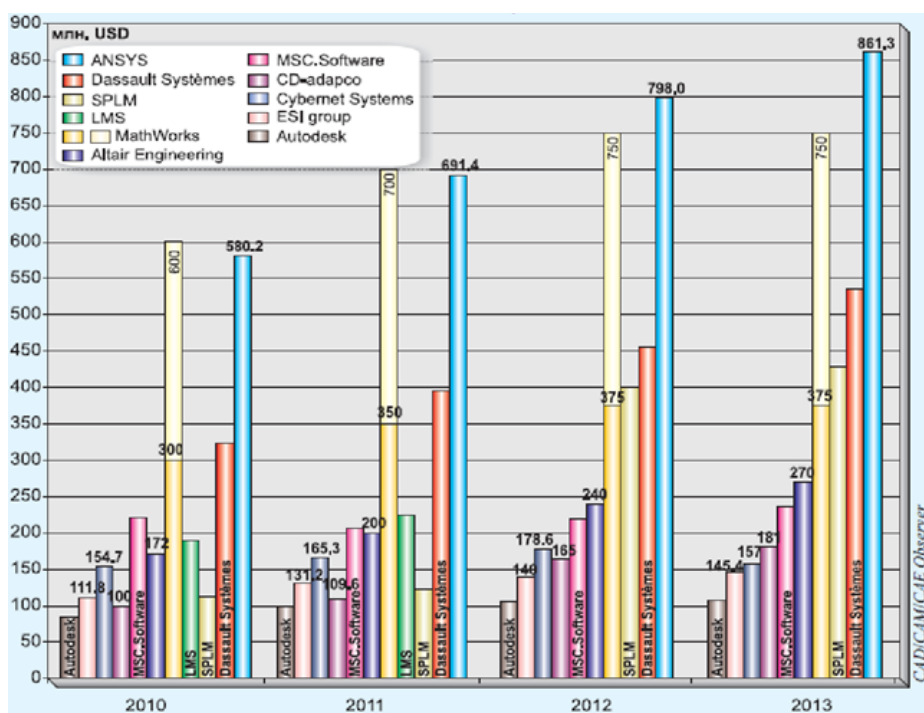


Рис. 2. Лидеры рынка CAE в 2010-2013 [6]

ANSYS

Продукты компании ANSYS включают в себя большой набор средств для моделирования электронных схем, печатных плат и электромагнитного моделирования, которые мы не рассматриваем в деталях, CFX и Fluent для моделирования потоков жидкости, переноса тепла и моделирования реакций, в большом диапазоне задач, например, аэродинамика в авиастроении, моделирование нефтяных платформ и моделирование потока крови. ANSYS Mechanical -- система для анализа деформаций, включая нелинейные и динамические, поддерживающая связанное решение задач деформации и теплового обмена, акустических и других, ANSYS Multiphysics и Simplorer. Интеграционная платформа ANSYS Workbench поддерживает интеграцию с многочисленными системами CAD, модификации и создания (ручного и автоматического) геометрических моделей и сеток, параметрического анализа и оптимизации и системного моделирования. Отдельная группа продуктов предназначена

для использования основных продуктов для масштабных вычислений на суперкомпьютерах (High-Performance Computing).

Приоритеты и тенденции развития. Общая стратегия развития ANSYS в течение долгого времени характеризуется лозунгом “Simulation-Driven Product Development”, т.е., разработка продуктов на основе моделирования. Общая тенденция в последних разработках компании – повышение интеграции разных типов моделирования. Мультидисциплинарное моделирование - уже долгое время одна из сильных сторон продуктов ANSYS, а приобретение компании Estrel и недавнее соглашение с Modeleon в перспективе добавляет средства поддержки системной инженерии к продуктам компании ANSYS расширяющих диапазон потенциальных клиентов компании: Estrel (моделирования встроенного программного обеспечения для критических систем), EVEN (Evolutionary Engineering AG), небольшая компания разрабатывающая систему анализа и оптимизации композитных материалов, SpaceClaim, производителя доступной системы CAD основанной на принципе прямого моделирования, и Reaction Design, моделирование химических реакций.

Altair

Компания Altair Engineering производит линию CAE продуктов HyperWorks, которые включают RADIOSS (анализ нелинейных и динамических деформаций), MotionSolve (твердотельное моделирование), набор средств для подготовки данных, генерации сеток и визуализации, в частности, HyperMesh с поддержкой дизайна изделий из композитов, AcuSolve (CFD), FEKO (электромагнитное моделирование) OptiStruct и HyperStudy (оптимизация), и системы для моделирования процессов HyperXtrude и HyperForm, Дочерняя компания SolidThinking выпускает продукты CAD Evolve и Inspire. Особый интерес представляет Inspire для дизайна на основании моделирования, который интегрирует средства оптимизации, в частности топологической оптимизации, в рабочий процесс концептуального дизайна. Другое недавнее приобретение Altair – компания PBSWorks, разработчик системных программ для HPC.

Приоритеты и тенденции развития. Как и Ansys, Altair развивает средства CAD в дополнение своих продуктов в области CAE, и средства HPC, сохраняя фокус на физическом моделировании. Основная отличительная черта компании Altair, делающая ее продукты уникальными – долговременный приоритет автоматической оптимизации формы (продукт OptiStruct существует более двадцати лет), в то время как другие крупные компании в области CAE включились в разработку средств оптимизации относительно недавно. Наличие этой технологии позволило Altair разработать решения

для композитных материалов, не имеющие аналогов у других производителей. Также это создает основу для будущих разработок в области CAD/CAE для аддитивных технологий.

MSC

Компания MSC – одна из старейших на рынке CAE, разработавший первоначальные версии кода Nastran (позднее, компания была вынуждена лицензировать Nastran другим компаниям, для прекращения дела о нарушении антимонопольного законодательства; так появились NX Nastran и Nei Nastran). После периода спада, и внутренней реорганизации, компания снова уверенно развивается.

Продукты компании включают продукты по всем основным направлениям моделирования: MSC Nastran и Marc (деформации и мультидисциплинарное моделирование), Adams (моделирование систем твердых тел), Easy5 Dytran (взаимодействие жидкости и твердых тел), Actran (акустика), Sinda (теплообмен), MSC Fatigue (усталость материалов), Digimat (моделирование изделий из композитов), Patran (моделирование и генерация сеток) и Easy5 (поддержку системного моделирования).

Приоритеты и тенденции развития. Компания MSC наиболее конкретно определяет свои приоритеты, концентрируясь на разработке нового продукта Apex, интегрирующего средства прямого геометрического моделирования и интеграции сеток, мультифизического моделирования и оптимизации.

По словам CEO компании Доминика Галлелло, “Моделирование сейчас – средство проверки качества [законченного дизайна]. Было бы предпочтительно использовать моделирование на намного более ранних стадиях дизайна. Знание [физического] поведения продукта на ранних этапах фантастически повышает производительность». Конкретные цели заявленные для Apex: ускорение процесса создания сеток в 10-50 раз, сокращение времени обучения работе с программой от дней и месяцев до часов, интерактивный рабочий цикл, увеличения максимального количества конечных элементов в 250 раз до 0.25 миллиарда, интеграция оптимизации, и открытие интерфейсов для программных средств других компаний [8].

MSC относительно мало участвовала в поглощениях стоит отметить, что как и многие другие компании, она приобрела компанию e-Xstream, производителя продукта Digimat для композитов.

Другие компании

Несмотря на высокий уровень консолидации, другие компании играют существенную роль. Например, продукт Sketchup (бывш. Google, теперь Trimble) является продуктом CAD с самой большой пользовательской базой (38 млн.) благодаря распространению бесплатной версии через Google. Хотя Sktechup, прежде всего, предназначен для АЕС, продукт используется во всевозможных целях.

Другое важное событие – приобретение компанией 3D Systems, крупнейшей на рынке аддитивных технологий, компании Geomagic, которая, незадолго до этого, купила

компанию Alibre, производящую систему MCAD уступающую по числу пользователей только Solidworks, принадлежащей Dassault Systemes.

Также интересен пример компании ZWCAD (Китай, с R&D в США). Хотя линейка продуктов компании и существенно уступает продуктам «большой четверки», благодаря рекомендации в 2013 году министерством промышленности и информационных технологий Китая, в качестве продукта соответствующего стандартам безопасности министерства, у компании могут появиться существенные дополнительные возможности для развития. Схожая ситуация складывается в России для компании АСКОН.

В развитии CAD/CAE систем можно выделить следующие основные тенденции:

Опережающий рост CAE и моделирования в широком смысле. Хотя компании, за исключением специализированных компаний CAE, редко включают развитие средств физического моделирования в список основных приоритетов, из анализа приобретений и финансовых тенденций рынка видно, что системы CAE играют все более возрастающую роль. Примечателен факт, что почти каждая крупная компания обзавелась средствами для моделирования композитных материалов, путем поглощения компаний работающих в этой области (Symault, Firehole Technologies, Fibersim, e-Xtreme).

Интеграция CAE/CAD, «демократизация» приложений CAE. В течение последних лет происходит постепенное переосмысление традиционного взгляда на место CAE в процессе проектирования, от средства проверки дизайна, к средству разработки. В связи с этим возникает необходимость снижения требований к квалификации пользователя систем моделирования, т.к. уже не приходится ожидать, что интерпретировать результаты будет, скорее всего, специалист по физическому моделированию. В наиболее явном виде эти тенденции проявились в приоритетах компаний Altair и MSC, но сходные идеи присутствуют в продуктах компании Autodesk и других.

Оптимизация. Хотя автоматическая оптимизация использовалась компанией Altair в течение долгого времени, продвинутое средство оптимизации интегрированное с CAE, стали появляться в продуктах других компаний сравнительно не давно; можно ожидать ускорения этой тенденции.

CAD в облаке. Практически все крупные компании CAD/CAE в той или иной форме выработали стратегию по облачным продуктам; если Autodesk делает облачные приложения ключевым приоритетом, остальные занимают более осторожную позицию, хотя и достаточно быстро перешли от точки зрения, что CAD плохо совместим с облаком, к развитию облачных продуктов, начиная с PDM, но быстро продвигаясь к CAD/CAE (on-demand CATIA и NX), и включению модели «программное обеспечение как услуга», в качестве одного из вариантов продаж. Следует отметить, что пока не ясно, для какой части рынка этот подход окажется подходящим: возможно, он поможет снизить планку доступа к средствам проектирования высокого уровня для среднего и малого бизнеса.

Повышение популярности решений multi-CAD, тенденция к разделению платформ и приложений и большей открытости. В этой области, Siemens PLM во многом занимает лидирующие позиции, вкладывая существенные ресурсы в поддержку multi-CAD решений, от PDM до CAE, и поддержание открытых форматов (JT, STEP). Традиционно, специализированные компании также уделяют этому большое внимание. Можно надеяться, что тенденции в этой области понизят барьер для выхода на рынок небольших компаний – производителей специализированных компонент.

Поддержка системно-инженерных продходов. Хотя шаги в этом направлении в относительно небольшие, заметно, что большинство компаний уделяют внимание интеграции средств поддержки MBSE в той или иной форме.

Поддержка аддитивных технологий. Хотя в той или иной форме примитивная поддержка аддитивных технологий появилась во многих продуктах (экспорт в STL, «очистка» сеток и т.п.) более серьезные средства, необходимые для 3D печати пока присутствуют только в отдельных, как правило, не основных продуктах. С недавним присоединением компании 3D Systems к рынку CAD можно ожидать начала более активных разработок в этой области.

2.2.5 Российские производители CAD и CAE – систем; тенденции развития

Россия имеет существенный потенциал для развития области, т.к. Российские компании обладают высоким уровнем компетенции, благодаря долгому опыту работы, в том числе в качестве поставщиков программных компонент для мировых лидеров. Россия

– одна из немногих стран с конкурентоспособными производителями CAD. Однако нужно отметить определенные сложности в развитии этого рынка в России.

Объем рынка CAD в России в 2013, по оценкам компании IDC, составили 162 млн. долларов, хотя реальный рынок может быть в 2-3 раза больше за счет нелегализованного программного обеспечения. В любом случае, он составляет крайне небольшую долю мирового рынка (более 8 миллиардов долларов), значительно меньшую, по отношению к GDP или объему производства, чем в развитых странах. Это свидетельствует, с одной стороны о существенных возможностях роста, но с другой стороны, низким интересом промышленности к внедрению решений CAD. Большая часть российского рынка контролируется крупными международными компаниями, но доля российских компаний на нем достаточно заметна.

Ведущие российские компании-разработчики

Аскон

Самый крупный среди российских производителей систем CAD – группа компаний Аскон, насчитывающая 700 Основные продукты – КОМПАС, ядро C3D, ЛОЦМАН:PLM) – самая крупная из российских компаний в этой области -- более 8500 клиентов, оборот - 983 миллиона рублей в 2013 г; по информации компании, ее доля российского рынка CAD составляет 15-20% [9]. Отличительной особенностью продуктов Аскон является собственное геометрическое ядро C3D, доступное для лицензирования.

Компания не разрабатывает средства CAE (поддерживается интеграция с продуктами НТЦ АПМ), но разработала полную линейку средств PLM и PDM, и специализированных расширений основных продуктов. Это позволяет компании успешно работать с предприятиями, которые должны использовать системы российских производителей по соображениям безопасности, например, участвовать в разработке типовой информационной системы ядерного оружейного комплекса (ТИС ЯОК), совместно с РФЯЦ-ВНИЭФ и основанной на продуктах Аскон. 8,5 тыс. Ведущие заказчики компании -- предприятия оборонно-промышленного и ядерного комплекса, дочерние компании «Газпрома»: НПК КБМ, «Газэнергосервис», концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор», «Ульяновский механический завод», ЦКБ «Титан», ФГУП ПО «Маяк», «Газпром центрремонт».

Топ

системы

Топ-системы – судя по всему, второй по величине российский производитель CAD (2500

клиентов). Основные продукты линии T-FLEX, основаны на ядре Parasolid, лицензированном у компании Siemens PLM Software. T-FLEX включает средства 2D и 3D CAD, основные средства CAE (Анализ и Динамика, для моделирования деформаций, теплового анализа, вибраций, усталости, и систем твердых тел), и средства CAD и PLM, и специализированные решения. В целом, по диапазону функций, предложения T-FLEX близки к другим программам CAD, рассчитанных на средний и малый бизнес. Существенное преимущество систем T-FLEX для российских потребителей – интеграция национальных стандартов. Компания T-FLEX, совместно с компанией ЛЕДАС участвует в разработке РГЯ (российского геометрического ядра), финансируемым правительством РФ. В настоящее время, планов переводить свои продукты на новое ядро у компании нет.

Нанософт

Компания Нанософт сравнительно необычна: ее базовый продукт, 2D система nanoCAD, распространяется бесплатно, и представляет собой открытую платформу для разработки (преимущественно платных) специализированных приложений. В настоящее время, доступно значительное количество таких приложений, например, для дизайна механизмов, электрической разводки, линий электропередач и т.п.

Ряд компаний-производителей специализируются на средствах CAE, в частности, **НТЦ АПМ** (WinMachine), компания **Фидесис**, компания **Тесис** и другие. Эти компании, получают значительную часть дохода от выполнения проектов моделирования изделий или конструкций по заказу, и также могут выступать как интеграторы программных продуктов международных компаний CAE (основная часть предложений Тесис).

Особое положение занимает компания **ЛЕДАС**, как производитель программных компонент, в частности, (до недавнего времени) геометрического решателя LGS *единственного* в мире конкурента решателя D-Cubed (Siemens PLM), доступного для лицензирования и РГЯ. LGS был продан компании Bricsys; часть разработчиков ЛЕДАС перешла в Bricsys, образовав российское отделение компании. До продажи технологий Bricsys, компания ЛЕДАС на протяжении многих лет разрабатывала программные компоненты для Dassault Systemes.

Другая уникальная компания – **DATADVANCE**, разрабатывающая продукт pSeven для многокритериальной оптимизации, анализа чувствительности, снижения размерности, планирования экспериментов, который не имеет прямых эквивалентов в продуктах ведущих международных компаний (как уже отмечалось, интеграция средств

оптимизации в CAD/CAE находится на достаточно раннем этапе); компания успешно сотрудничает с клиентами в различных областях, включая сотрудничество с Airbus.

Ряд зарубежных компаний (Bricsys, TurboCAD, Mentor Graphics) имеет отделения разработки в России.

Большую роль на российском рынке CAD/CAE играют компании предоставляющие услуги по внедрению программных средств, системной интеграции и производству инженерных расчетов.

Многие компании услуг в области CAD/CAE, например, **CompMeshLab**, конкурентоспособны на мировом рынке, и имеют значительное количество клиентов за рубежом. Другой пример – Саровский инженерный центр, сочетающий инженерные услуги и продажу продуктов CAE компании CD-adapco.

Довольно большое число российских компаний производит специализированные программные продукты для проектирования и расчета в узких областях, например, трубопроводов, проектирования мебели и т.п. В некоторых случаях, например, продукты CSoft, разрабатываются как расширения программ общего назначения (в случае CSoft, AutoCad),

Ведущие западные компании, прежде всего Siemens PLM, Autodesk и Dassault Solidworks, занимают прочные позиции на российском рынке. Например, их клиентами являются ОАО «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» (300 мест Teamcenter), производство Ил-76МД-90А. «КАМАЗ» (260 мест NX и 1350 мест Teamcenter разработка магистрального тягача КАМАЗ-5490 . Решения Siemens PLM Software для разработки и производства пассажирского самолета Sukhoi Superjet 100, в ОАК и НПК «Уралвагонзавод»[10].

Российский рынок CAD растет быстрее развитых стран, во многом за счет низкого уровня внедрения и перехода на легальное программное обеспечение в последние годы.

2.2.6 Обобщение и анализ

Параметры спроса

Благодаря высокой степени зависимости процесса разработки продуктов от программных систем, прогресс в этой области имеет принципиальное значение практически для всех производителей, в особенности в высокотехнологичных областях. Современное состояние средств САХ, наиболее благоприятно требованиям крупных традиционных потребителей (например, автомобильных и авиационных компаний), с

относительно длинными циклами разработки, большими отделами разработки новых продуктов, включающие группы специалистов по каждому этапу разработки продукта. Это, прежде всего, связано с доминирующей моделью бизнеса компаний «большой четверки» ориентирующихся на крупных клиентов (нпр., стоимость рабочего места CATIA Dassault Systemes варьируется от \$10,000 до \$60,000, плюс 18% стоимости в год за поддержку, делающую продукты высокого уровня (CATIA, NX) малодоступными для средних и мелких компаний).

Продукты среднего уровня (Solidworks, SolidEdge, Autodesk Inventor) доступны для среднего бизнеса, но имеют более ограниченные возможности особенно в части САЕ.

В тоже время, спрос на средства проектирования со стороны небольших компаний, занимающихся производством в определенных нишах, стабильно растет, и их приоритеты начинают оказывать заметно большее влияние на развитие программные продукты. В частности, упрощение интерфейсов пользователей особенно для САЕ, изменение ценовой политики, в частности связанное с перемещением в облако, расширяет возможности для среднего и малого бизнеса.

В России, относительно низкий спрос, по сравнению с размерами экономики, ведет к сложным условиям для российских производителей. Крупные компании в авиастроительной автомобилестроительной областях, наиболее продвинутые в области внедрения CAD, как правило, работают с компаниями «большой четверки», а спрос российского среднего и малого бизнеса на продукты CAD недостаточно развит для поддержания активного развития области, требующего существенных вложений.

Условия развития области

Успешное развитие области, вне зависимости от национального контекста, и максимизация эффекта от развития CAD требует нескольких условий:

Стимулирования развития продуктов. Создание условий и поддержка инфраструктуры для тесного взаимодействия разработчиков с промышленными пользователями систем, для создания продуктов, пользующихся спросом. Как показывает пример сотрудничества компании Аскон с ВНИИЭФ, госкорпорации могут играть важную роль, сотрудничая с производителями.

Образование пользователей, поддержка внедрения. Продукты CAD и особенно САЕ требуют высокого уровня подготовки пользователей, на уровне менеджмента

компаний, также требуется понимание потенциала внедрения средств CAD/CAE/PLM, в сочетании с перестройкой производственных процессов.

Эти факторы требуют развития, системы образования пользователей, нацеленную не только на обучение конечных пользователей отдельным элементам систем, но и адаптацию производственных процессов к использованию средств САх на всех уровнях.

Стандартизация. Поддержка усилий по стандартизации форматов данных и технологий интеграции систем, поощрение поддержки общих (в частности, открытых) стандартов отдельными компаниями-разработчиками, создание и использование платформ, в том числе зарубежных. Как показывает пример многих успешных российских компаний, значительная доля дохода в области получается именно за счет разработки специализированных расширений существующих продуктов общего назначения; максимальное облегчение выхода на рынок таких расширений – ключевой элемент развития области.

Опережающие научные разработки. Поддержка научно-исследовательских организаций и университетов, ведущих фундаментальные исследования в областях, связанных с САх, поддержка внедрения. Более детально, перспективные направления научных исследований обсуждаются в следующем разделе.

Научные направления развития CAD и CAE

Как понятно из наблюдаемых тенденций развития коммерческих систем, продолжение развития систем в этих направлениях требует новых технологий, прежде всего, в области CAE.

Многоуровневое моделирование и вычисления. Стандартные подходы к моделированию (например, повсеместно используемые подходы, основанные на неструктурированных сетках и конечных элементах), не позволяют, даже при использовании НРС, эффективно моделировать системы и материалы со сложной структурой различных масштабов: композитных, наноматериалов, материалов произведенных с помощью аддитивных технологий и биоматериалов. Например, локальная конфигурация волокон композитного материала, может иметь критическое влияние на максимальные напряжения; в тоже время, не возможно моделирование полной структуры на уровне отдельных волокон, и необходимо использовать. Необходима разработка методов и систем, позволяющих производить вычисления на разных уровнях разрешения, пространственного и временного, используя различные модели, и

контролировать ошибки вычислений при переносе информации между уровнями, максимизируя эффективность вычислений. Большинство существующих коммерческих продуктов не поддерживают автоматическую и контролируемую связь вычислений разного масштаба, хотя первые специализированные средства с поддержкой многоуровневого моделирования уже появились. Другой важный вариант многоуровневых вычислений, – решение больших (сотни миллионов переменных) линейных и нелинейных систем уравнений, возникающих при моделировании, с помощью разных типов многоуровневых алгоритмов, одна из сильных сторон которых – хорошие возможности распараллеливания вычислений.

Методы понижения размерности. Сложные системы, состоящие из большого количества частей, структуры и материалы с гетерогенной структурой требуют больших вычислительных ресурсов для моделирования. Это делает оптимизацию (требующую многократного моделирования системы для разных значений оптимизированных параметров) либо невозможной, либо слишком медленной или затратной.

Применение существующих и разработка новых методов понижения размерности позволит автоматически создавать приблизительные описания компонент, или частей системы, позволяющие на порядки уменьшить вычислительные ресурсы для "внутреннего цикла" оптимизации.

Технологии интеграции дизайна, анализа и оптимизации. Эффективность современных систем CAD/CAE ограничена традиционной разделенностью компонент, для разных стадий, создающую препятствия для ускорения цикла дизайна. Интеграция существующих методов и компонент, разработанных без учета контекста оптимизации, имеет ограниченную эффективность. Для интеграции всех этапов цикла в единое целое, необходима разработка новых представлений данных и алгоритмов, для интегрированного моделирование разнородных физических процессов и систем (механических, тепловых, электрических); например, для оптимизации формы, предпочтительны алгоритмы не требующие или минимизирующие необходимость генерации сеток. Другим важным направлением являются исследования по созданию новых типов пользовательских интерфейсов для интегрированных систем, с целью упрощения изучения пространства возможных решений, а также снижающих требования к квалификации пользователя.

Эффективные и надежные геометрические алгоритмы. Ведущие компании в области CAE в последнее время уделяли существенное внимания средствам

геометрического моделирования, прежде всего, связанных с построением сеток. В контексте оптимизации формы, проблемы автоматического создания сеток, или использования CAD геометрии напрямую (**изогеометрический анализ**) имеют большое значение.

Статистические методы и методы машинного обучения для инженерных приложений. Вычислительное моделирование сложных систем и структур создает значительные объемы данных; применение статистических методов и методов машинного обучения позволяет находить критические зависимости системы от параметров, которые могут использоваться в процессе оптимизации, и создании моделей пониженной размерности. Этот тип подходов уже успешно разрабатывается компанией DATADVANCE.

Моделирование редких событий. Во многих задачах проектирования необходимо учитывать крайне редкие, но катастрофические для системы события, например, эффекты потоков частиц на электронные компоненты спутников. Создание вычислительных методов, позволяющих эффективно обнаруживать возможные события такого рода, и точно оценивать их последствия и вероятность, имеет фундаментальное значение для разработки критических систем, требующих высокого уровня надежности.

CAD для биологических структур материалов. Современные методы дизайна и моделирования преимущественно предназначены для проектирования промышленных систем и механизмов различных типов и архитектурных конструкций. С развитием биоинженерии, возникает необходимость проектирования биологических систем, с учетом их естественного изменения (например, создание опорных структур для трансплантатов, искусственных органов). Такие задачи требуют развития новых математических и вычислительных методов, нацеленных на моделирование структур с учетом биологических процессов.

Использование сенсорных данных в процессе проектирования. Многие задачи современного проектирования, прежде всего, связанные с индивидуализацией продуктов, требуют учета контекста, т.е., уже существующих объектов, с которыми проектируемый продукт должен взаимодействовать: например, адаптация мебели к помещению или одежды или обуви к потребителю. Это требует разработки эффективных и автоматических методов построения компьютерных моделей, возможно, с учетом не только геометрии но и физических параметров, существующих предметов. В свою очередь, методы дизайна, анализа и оптимизации должны быть приспособлены к работе с

автоматически построенными, часто неполными и неточными, моделями реальных объектов. Другое направление исследований, связанное с использованием измерений в проектировании -- т.н. "ассимиляция" данных, т.е. разработка систематических подходов к адаптации вычислительной модели и включением оптимизационный процесс данных полученных путем испытания прототипов или предыдущих версий продуктов.

Масштабы влияния

Хотя конкретные масштабы влияния оценить трудно, из всех технологических факторов, информационные технологии, в частности, технологии CAD/CAE, имеют наиболее широкое и существенное влияние на ускорение инноваций, сокращение и снижение стоимости разработок новых продуктов, и, как следствие, повышение конкурентоспособности.

Примеры такого влияния включают:

Для крупных компаний: системы CAD/CAE делают возможным полное моделирование сложной системы (например, самолет, электростанция, спутник), включая сборку частей, электрические, механические и химические процессы и их взаимодействие может существенным образом сократить необходимость экспериментальной проверки отдельных систем, и их переделки в результате несовместимости выявленной на поздних этапах разработки.

Например, компании Boeing, благодаря использованию PLM и моделирования при создании 787, удалось уменьшить общее время, затраченное на разработку на год [11].

Для небольших компаний и стартапов: доступность интегрированных средств САХ, частности, ориентированных на пользователя, не обладающего экспертизой в определенной области, а так же возможность использования открытых элементов дизайна, существенным образом снижает риски, и уменьшает время разработки новых продуктов. До последнего времени, небольшие компании преимущественно пользовались простейшими средствами CAD; последние инициативы Autodesk и других компаний по модели «программное обеспечение как услуга», а также CAD стартапов, подобных sunglass.io, значительно расширяет возможности применения CAD/CAE и PDM для этой категории пользователей.

Заметим также, что многие, если не все, новейшие технологии производства существенным образом зависят от программной поддержки: например, использование

систем аддитивных технологий в принципе не возможно без создания компьютерных моделей изделий, что объясняет интерес ведущих компаний 3D печати Stratasys и 3D Systems к средствам CAD.

В качестве компонент общей системы PLM, средства CAD/CAE также являются необходимой частью перестройки производственных процессов для повышения эффективности и гибкости производства.

2.2.7 Оценки перспектив для России

Как уже было отмечено, мировой рынок продуктов CAD доминируется небольшим числом западных компаний, но также включает в себя большую экосистему небольших и средних компаний. В России, возможности для такого типа компаний включают несколько направлений, большинство которых уже существуют в различных формах.

Возможности для производителей

1. Поддержка российских стандартов, адаптация к специализированным требованиям российских потребителей. На данный момент, можно сказать, что это является одним из основных направлений работы большинства разработчиков систем CAD. Благодаря этому фактору, на рынке присутствует значительное количество продуктов ориентированных на специализированные приложения; особенно много таких продуктов в области приложений для АЕС, где поддержка национальных стандартов имеет первостепенное значение.

2. Разработка инновационных продуктов для мирового рынка (например, оптимизация, CAD для аддитивных технологий, полностью интегрированные продукты CAD/CAE, инновационные компоненты), основанных на фундаментальных разработках в России; на данный момент, таких примеров относительно мало (компании ЛЕДАС, DATADVANCE), но представляется, что наличие большой научной традиции в области моделирования и оптимизации, и сохранение относительно высокого уровня фундаментального образования создает определенные конкурентные преимущества.

Постепенное открытие платформ ведущих производителей CAD потенциально создает новые возможности в этой области, по модели, например, разработки приложений на платформе Android, если, подобно Altair, ведущие производители начнут поддерживать распространение продуктов внешних производителей.

3. Разработка систем, отвечающих требованиям правительственным требованиям безопасности. Хотя в последнее время вопросы безопасности программного

обеспечения и импортозамещения и вышли на передний план, возможности развития в этой области, в отсутствие существенных изменений политики государства, представляются ограниченными: хотя оборонный сектор и включает в себя много крупных потребителей CAD/CAE, емкость этого сектора ограничена, и не может заменить широкий рынок среднего и малого бизнеса.

4. «Интеллектуальный аутсорсинг» -- выполнение заказов крупных западных компаний на разработку модулей для крупных систем.

Наибольшую ценность в области развития перспективных производственных технологий представляют первые два направления. Расширение первого направления, в настоящий момент преобладающего в России, зависит от расширения базы российских пользователей.

Возможности для потребителей. Потенциально, средства CAD/CAE, особенно используемые совместно в контексте PLM, предоставляют существенные конкурентные преимущества для компаний-пользователей. Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, в конечном итоге, программное обеспечение – лишь инструмент, и определяющим фактором повышения эффективности, является организация производственного процесса, в том числе с учетом возможностей существующих инструментов CAD/CAE. Для крупных российских компаний, еще не выработавших стратегию в этой области, возможности, в отсутствие ограничений связанных с безопасностью, в целом эквивалентны существующим для крупных западных компаний, т.к. им доступны услуги и продукты компаний Dassault и Siemens PLM, а также российских консалтинговых компаний и интеграторов работающих с этими системами.

Наиболее ограничены возможности средних и малых компании, по нескольким причинам: несоответствие функционала «коробочного» программного обеспечения нуждам их процессов; во многих случаях, отсутствие понимания необходимости изменений в производственном процессе; недостаточный уровень подготовки персонала для использования CAD/CAE, и трудность оценки экономического эффекта от внедрения дорогостоящих новых систем в производственный процесс.

Технические тенденции в развитии CAD/CAE, описанные ранее, помогают решать часть этих проблем (снижение стоимости, упрощения использования), но не решают задачи преодоления несоответствия нуждам потребителей, и выработки планов изменения процессов.

2.2.8 Список литературы

- [1] "CAD Trends," [Online]. Available: http://www.business-advantage.com/landing_page_CAD-Trends.php.
- [2] G. Satell, "Why Autodesk Is Investing In The Democratization Of Design," 9 February 2014. [Online]. Available: <http://www.forbes.com/sites/gregsatell/2014/09/02/why-autodesk-is-investing-in-the-democratization-of-design/>.
- [3] V. Ogewell, "Autodesk's CEO, Carl Bass: We want to change the way people work – TV Report," 12 December 2013. [Online]. Available: <http://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/6808/Autodesks-CEO-Carl-Bass-We-want-to-change-the-way-people-work-TV-Report.aspx>.
- [4] V. Ogewell, "Autodesk's CEO, Carl Bass: We want to change the way people work – TV Report," [Online]. Available: <http://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/6808/Autodesks-CEO-Carl-Bass-We-want-to-change-the-way-people-work-TV-Report.aspx>.
- [5] J. Hayes, "Chuck Grindstaff on how Siemens gets the core of PLM right," 29 April 2013. [Online]. Available: <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/5651/Chuck-Grindstaff-on-how-Siemens-gets-the-core-of-PLM-right.aspx>:
- [6] С. Павлов, "CAE-технологии в 2013 году: обзор достижений и анализ рынка," CAD/CAM/CAE Observer, no. 4, pp. 8-18, 2014.
- [7] J. Brown, "PTC PLM Vision 2014+," 7 January 2014. [Online]. Available: <http://tech-clarity.com/ptc-vision-2014/3423>.
- [8] N. S. Johnson, "MSC Aims to Take CAE from Frustrating to Efficient," 1 October 2014. [Online]. Available: <http://www.cadalyst.com/testing-analysis/cae/msc-aims-take-cae-frustrating-efficient-20560>.
- [9] CNews, «Выручка «Аскон» по итогам 2013 г. составила 983 млн руб.,» 2 апреля 2014. [В Интернете]. Available: <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2014/04/02/566505>.
- [10] Д. Ушаков, «Традиции и инновации Siemens на службе российской промышленности,» 27 мая 2013. [В Интернете]. Available: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=16151.

[11] B. Stackpole, "Boeing's Global Collaboration Environment Pioneers Groundbreaking 787 Dreamliner Development Effort," 15 May 2007. [Online]. Available: http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=225598.

2.3 Промышленная и сервисная робототехника

2.3.1 Определения и типология робототехники

Целью настоящего раздела является исследование областей промышленной и сервисной робототехники (robotics), влияющих на производство изделий, добычу полезных ископаемых и транспорт, в качестве определения робота принята формулировка стандарта ISO 8373:2012 (пункт 2.6) [8373] :

Робот – приводной механизм, действия которого программируются в двух и более осях и выполняются с определенной степенью автономности, осуществляющий движение в определенной для него среде, исполняя предназначенные задачи.

Данный стандарт выделяет два основных класса роботов: промышленных и сервисных, среди последних - подклассы профессиональных и персональных роботов.

Стандарт [8373] дает следующие определения:

- Промышленный робот - автоматически управляемый, перепрограммируемый, многоцелевой манипулятор, программируемый в двух или более осях для использования в автоматизации промышленности, который может быть либо зафиксирован в месте установки или иметь возможность перемещения.
- Сервисный (профессиональный) робот - выполняет полезные задачи для людей или оборудования, за исключением промышленных роботов.

Типология промышленной и сервисной робототехники имеет несколько измерений:

А. По типу рынка, отрасли промышленности или хозяйства, применяющего РТК:

- Промышленная робототехника: автомобилестроение, сборка электроники, автозапчасти и так далее, по индустриям;
- Сервисная (профессиональная) робототехника: Полевая робототехника, в тч, полеводческая, животноводческая, деревообрабатывающая и тд. Профессиональная уборка. Мониторинг и наблюдение за объектами. Строительство и снос зданий. Логистика и транспорт. Так далее

В. В зависимости от стихии применения РТК: наземные, воздушные, морские (надводные, подводные), космические.

- С. В зависимости от физической формы РТК: манипуляторы, робототехнические платформы, экзоскелеты, метаморфные РТК, нано и микро-роботы, антропоморфные.
- Д. В зависимости от степени автономности управления РТК: программируемые, телеуправляемые, супервизорные, коллаборативные, автономные.

2.3.2 Экономические и социальные факторы развития робототехники

Робототехника стала одним из наиболее обсуждаемых и упоминаемых направлений на любом индустриальном или инновационном форуме. Недавний опрос, проведенный американским исследовательским центром Пьюи среди 1 896 экспертов из бизнеса и науки, выявил, что подавляющее большинство из них верят в то, что робототехника трансформирует жизнь человека самым значительным образом в течение следующих 10 лет [Pew].

Различные частные организации и государственные ведомства проводят большую аналитическую работу по сбору данных и прогнозированию развития отрасли робототехники. В таблице 2-** собраны важнейшие экономические прогнозы развития отрасли робототехники.

Таблица 2-**. Важнейшие прогнозы отрасли робототехники

Прогнозы	Оценка (млрд долл. США)
Общее влияние робототехники на мировую экономику к 2025 г. [McK1]	5 270
Мировой рынок всех видов робототехники и программного обеспечения к 2020 [Kyt]	151
Мировой рынок индустриальной робототехники к 2020 г. (двукратный рост по отношению к 2013 г.) [SPARC1]	75
Размер рынка робототехники в Японии к 2020 по плану К. Абе [Abe]	25
Рынок беспилотных летательных аппаратов к 2020 [FT1]	12
Рынок сервисной робототехники к 2020 [WRbt 2014]	29

Большинство исследователей выделяют три основных фактора востребованности робототехники.

Во-первых - традиционная конкуренция за повышение производительности труда. Низкая стоимость рабочей силы в Юго-Восточной Азии перестала быть основным фактором, влияющим на выбор месторасположения производственных мощностей. Компании осознали, что близость к потребителю является стратегическим конкурентным преимуществом, и поэтому активно инвестируют в автоматизацию и роботизацию, компенсируя затраты на дорогостоящую рабочую силу повышением производительности труда за счет максимальной автоматизации ручного труда. К примеру, фабрика компании Филипс в Дании, использующая современных промышленных роботов, имеет численность рабочих в 10 раз меньшую, чем аналогичная фабрика в Китае, имеющая сопоставимый объем выпуска продукции.

Основной причиной повышения производительности труда при массовом использовании роботов является повышение коэффициента использования оборудования за счет сокращения времени перенастройки и незапланированных простоев. Также производительность труда возрастает за счет:

- Поддержания постоянного темпа работы в режиме 24/ 7;
- Возможности ускоренного изменения конфигурации производственной линии при внесении изменений в производственный процесс;
- Высокой точности и повторяемости результата;
- Распространения многоцелевых РТК, выполняющих несколько видов операций в ходе одного производственного процесса.

Внедрение робототехники также уменьшает общую энергоемкость производства, так как для размещения РТК требуется помещение меньшей площади, и помещение, в котором размещаются РТК, может иметь более слабый уровень освещения и отопления, когда постоянное присутствие людей не требуется.

Во-вторых – повышение среднего возраста трудоспособного населения в развитых странах, например средний возраст мужчин в Японии – 46 лет. Компания BMW ожидает, что к 2020 году средний возраст работников составит примерно 55 лет. Активная, а главное, безопасная деятельность трудящихся старшего возраста достигается за счет высокой степени автоматизации их работы на производстве. Например, на заводе БМВ рабочие управляют операцией очистки тяжелых литейных форм с помощью мощных манипуляторов KUKA. Среди причин внедрения автоматизации этого процесса БМВ называет именно увеличение среднего возраста работников [WRbt 2014], стр 441.

Последствия важны не только для компании, но и для общества, так как активная жизнь более пожилых людей приводит к уменьшению нагрузки на молодое поколение.

В-третьих - создание безопасных производственных условий. Использование робототехники в промышленности, энергетике или при добыче полезных ископаемых повышает безопасность труда, уменьшая риск вредных факторов производства, последствий аварий и чрезвычайных ситуаций. Сокращение аварийности происходит за счет исключения рутинных операций и снижения общей усталости работающих.

2.3.3 Структура отрасли промышленной и сервисной робототехники

Мониторинг МФР [Wrbt] позволяет распределить поставки промышленных роботов по индустриям использования, диаграмма 2-R-1.

Диаграмма 2-R-1. Объемы продаж в тысячах роботов по секторам промышленности 2011-2013 гг.

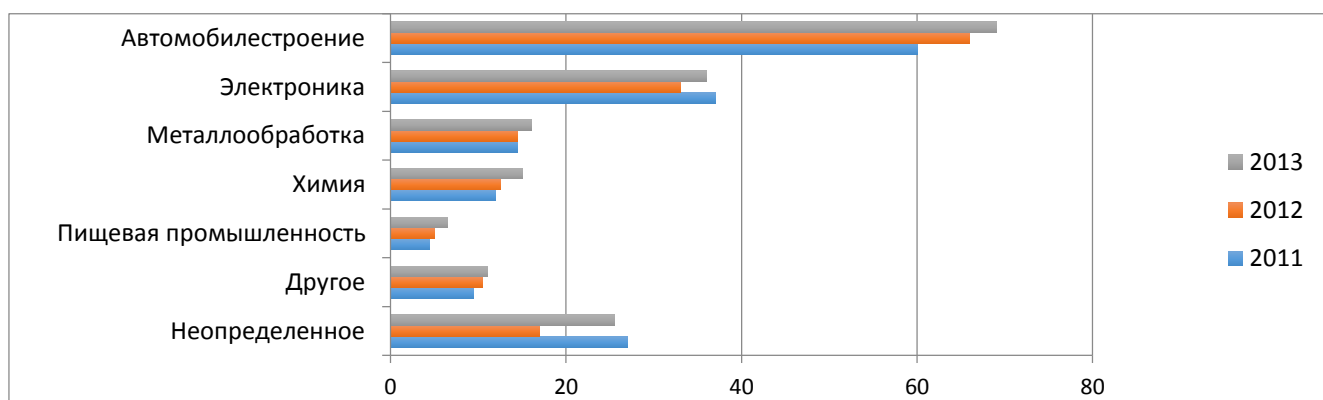


Диаграмма 2-P-2. Сравнение плотности роботов (число роботов на 10 000 трудящихся) в автомобилестроении и других отраслях производства в некоторых странах [Wrbt].

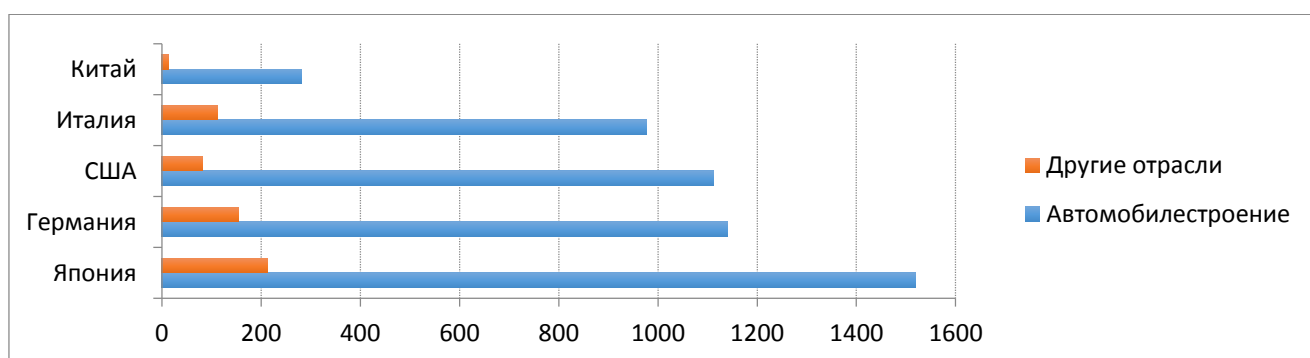


Диаграмма 2-R-1 показывает, что промышленные роботы активно применяются во всех видах производств, но лидирующими отраслями являются автомобилестроение (и смежная отрасль автозапчастей) и электроника.

Согласно [IFR] насыщенность роботами производства электроники и бытовой техники возросла почти в три раза по сравнению с 2009 годом. Низкая стоимость рабочей силы в странах Азии перестает быть конкурентным преимуществом, что вызывает трансформацию производства азиатских сборочных компаний. Например, заключено соглашение между компаниями Apple и Foxconn об инвестициях в роботизацию производства тайванского производителя в размере около \$7 млрд [App], основным поставщиком оборудования по этому соглашению является японский производитель робототехники FANUC.

Диаграмма 2-Р-3 показывает распределение роботов по странам.

Средне-мировой уровень плотности промышленных роботов составляет 62 робота на 10 тыс. занятых в промышленности, для стран Европы он равен 82, Северной Америки – 73 и Азии – 51. Для Китая плотность составляет 14, а для России – 2 робота на 10 тыс. занятых в промышленности.

Диаграмма 2-Р-3. Количество используемых роботов на 10 000 занятых в производстве по избранным странам

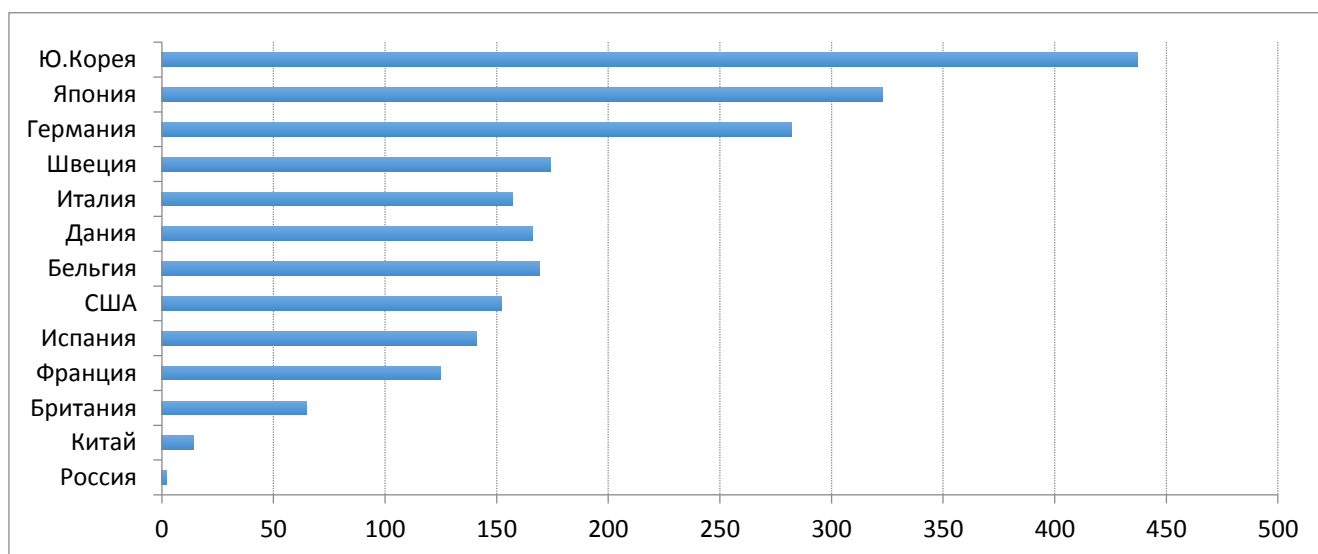


Диаграмма 2-Р-4 показывает региональное распределение продаж промышленных роботов в 2013 г. – в тихоокеанский регион поставляется больше роботов ежегодно, чем в Европу и Америки вместе взятые.

Диаграмма 2-Р-4. Продажи промышленных роботов в зависимости региона (тыс. шт) в 2013г.

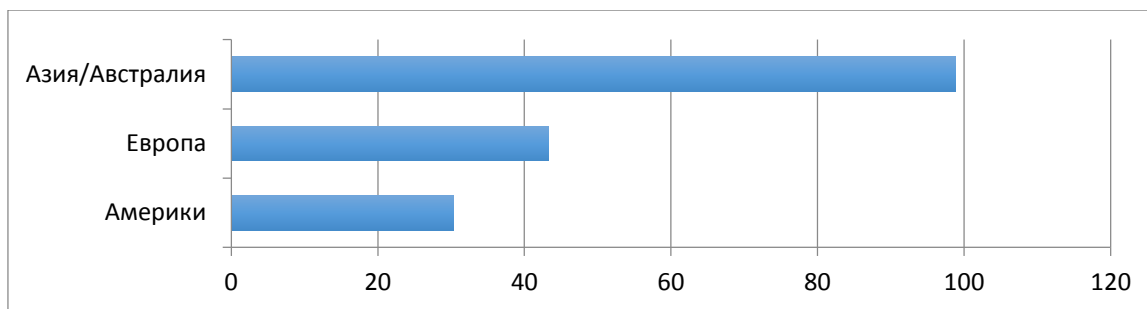
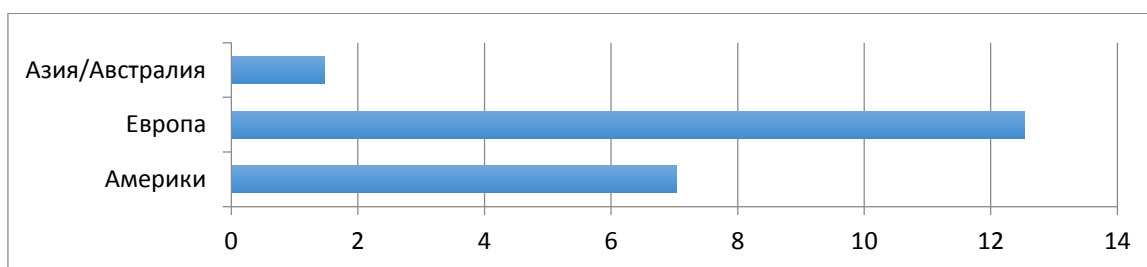


Диаграмма 2-Р-5 иллюстрирует региональное распределение продаж сервисных роботов. Отличие от продаж промышленных роботов объясняется тем, что промышленное производство в Китае еще не окончило фазу роста и собственники производства фокусируются на максимальной автоматизации процессов, которые уже доказали свою привлекательность с точки зрения вложения средств.

Диаграмма 2-Р-5. Продажи сервисных роботов в зависимости от региона (тыс. шт.) в 2013 г.



По оценкам МФР [WRbt] с 1998 в мире было разработано, продано и задействовано около 150 000 сервисных роботов всех видов, что примерно в 10 раз меньше общей инсталлированной базы промышленных роботов. Почти половина проданных в мире сервисных роботов имеют военное применение.

Диаграмма 2-Р-6 Поставки сервисных роботов по областям применения (шт.) 2012-2013 гг.[WRbt]

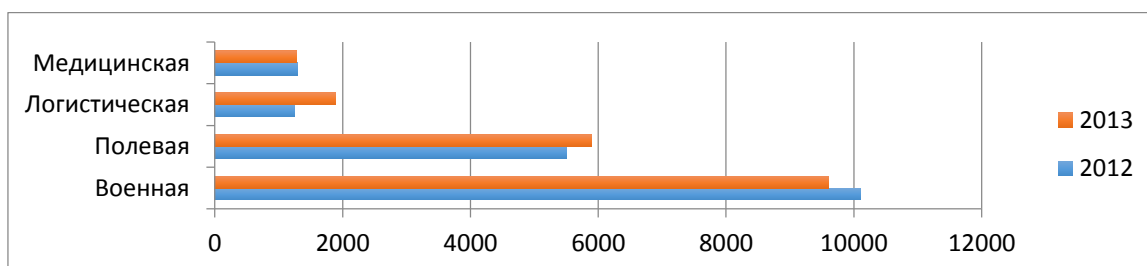


Таблица 2-Р-3 содержит сводные цифры по робототехнике.

Таблица 3. Ключевые индикаторы отрасли робототехники 2013 г. [WRbt]

Показатель	Значение
Число проданных промышленных роботов	179 тыс. шт.
Число проданных сервисных роботов (в тч военных – 45%)	21 тыс. шт.
Мировой рынок промышленной робототехники	\$29 млрд
Мировой рынок сервисной робототехники	\$3.57 млрд
Общее количество инсталляций промышленных роботов	До 1, 6 млн. шт.
Общее количество произведенных сервисных роботов	До 150 тыс.шт.

В таблице 4 приведены сведения о крупнейших мировых производителях робототехники.

Таблица 4. Крупнейшие мировые компании-производители промышленных роботов

Компания	Краткое описание
Siemens AG Германия	Немецкий транснациональный концерн, работающий в области промышленной техники (включая робототехнику) электротехники, электроники, энергетического оборудования, транспорта, медицинского оборудования и светотехники, а также специализированных услуг в различных областях промышленности, транспорта и связи.
Rockwell Automation США	Ведущий американский производитель микроконтроллеров и средств промышленной автоматизации, электрооборудования и программного обеспечения.
FANUC Япония	Японская компания, производитель ЧПУ и систем промышленной автоматизации, а также промышленных роботов. Название компании представляет собой акроним от Factory Automation NUmerical Control («Автоматизация технологических процессов и Числовое управление»). Деятельность компании FANUC сосредоточена в трех сферах: Станки, Лазерное оборудование, Промышленные роботы.
KUKA Германия	Немецкая компания, производитель промышленных роботов. Компания заявляет, что является одним из трёх ведущих поставщиков промышленных роботов для автомобильной промышленности на мировом и ведущим поставщиком на европейском рынке. KUKA имеет 25 дочерних компаний в Соединенных Штатах, Мексике, Бразилии, Японии, Китае, Корее, Тайване, Индии и почти всех европейских странах, главным образом это филиалы по

	продажам и обслуживанию.
ABB Швеция	Asea Brown Boveri Ltd. — шведско-швейцарская компания, специализирующаяся в области электротехники, энергетического машиностроения и информационных технологий. Компания основана в 1988 году слиянием шведской компании ASEA и швейцарской Brown, Boveri & Cie. Офисы концерна представлены в более 100 странах мира
Yaskawa Motoman Япония	Американский филиал японской компании Yaskawa Electric Corporation, ведущего мирового производителя инверторов, сервоприводов, контроллеров и промышленных роботов. Основанная в 1915 году, YASKAWA была пионером в управлении движением и приводной техники, запуске инновационных продуктов, которые оптимизируют производительность и эффективность машин и систем. Продукты и решения YASKAWA помогают управлять автоматизацией процессов в различных отраслях промышленности, таких как горнодобывающая промышленность, сталелитейная, станочная, автомобильная, упаковочная, деревообрабатывающая, текстильная, полупроводниковая и других.

Промышленная робототехника в Китае

Китай стал основным рынком сбыта для промышленных роботов: в 2013 г 20% от годовых продаж промышленных роботов (почти 37 000) приходится на КНР [WRbt]. Полное число используемых роботов в китайской промышленности достигло 133 тыс. штук (в том числе около 10 тыс. роботов, установленных на заводах тайваньской компании Foxconn в Китае). МФР [WRbt] указывает, что реальное количество роботов в Китае может быть гораздо выше, так как в статистике учтены только официальные продажи. Однако и эти цифры указывают на существенный рост и важный тренд: Китай является и будет являться основным потребителем промышленной робототехники.

Основной причиной этого является снижение производственных издержек и повышение производительности труда. Так, по данным [II] объем промышленного производства в Китае вырос на 70% за период 1996-2008 гг., а занятость в этом секторе

упала на 25%, что может быть объяснено лишь увеличением доли автоматизации на производстве.

Значительные вложения в автоматизацию и роботизацию автомобилестроения в КНР привели к существенному росту плотности роботизации в этой отрасли – 281 робот на 10 тыс. работающих. Рост использования робототехники в других секторах также присутствует, но общее значение плотности роботизации в Китае все еще в почти в 4 раза уступает среднемировому и оставляя место для роста.

Диаграмма 7. Годовые поставки промышленных роботов в Азии по данным МФР 2014 г. (тыс. шт)

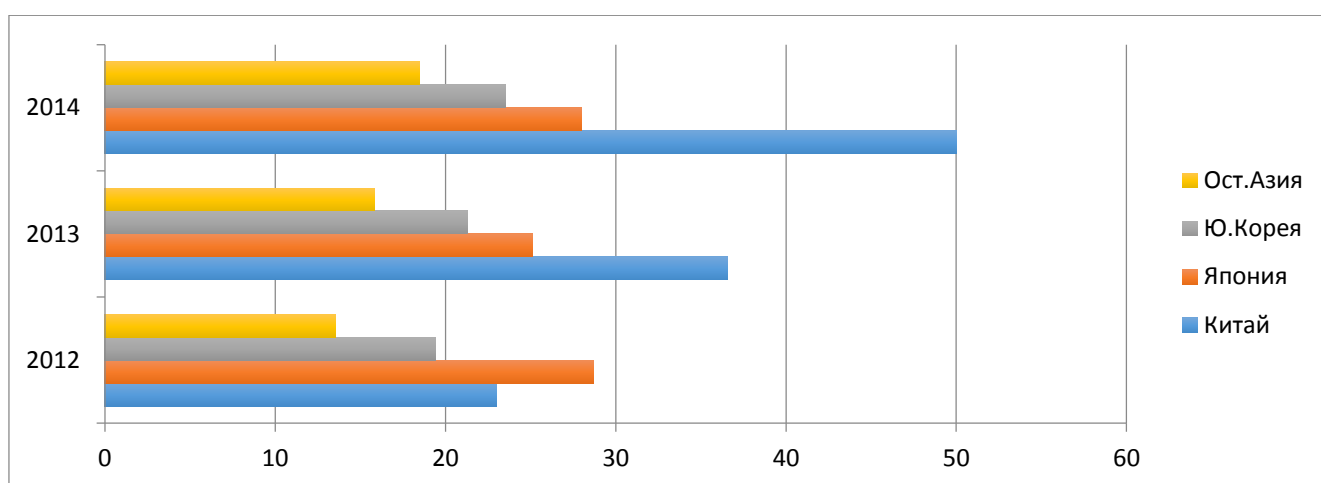
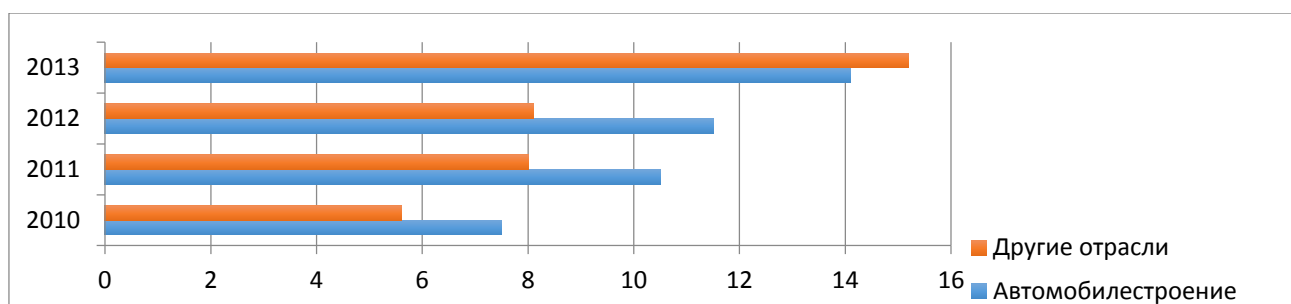


Диаграмма 8. Годовые продажи промышленных роботов по отраслям производства в Китае (тыс. шт)



Очень важным фактором является то, что каждый третий робот, проданный в Китае в 2013, был также произведен в Китае [WRbt].

2.3.4 Текущий статус технологий промышленной и сервисной робототехники за рубежом

Совместное использование роботов и людей, гибкие производственные ячейки

Данные предыдущих разделов свидетельствуют о том, что роботы используются массово практически во всех отраслях, что делает возможным широкую оптимизацию производственных процессов, которые разрабатываются, моделируются и внедряются заранее с расчетом на тотальную роботизацию и совместную работу машин и рабочих.

В частности, этому посвящен европейский исследовательский проект LIAA – Lean Intelligent Assembly Automation [LIAA] создающий типовую архитектуру организации производства на базе совместной работы людей и роботов.

Одним из следствий тренда на оптимизацию рабочего пространства с учетом тотальной роботизации производства (в том числе разнородного, мелкосерийного) является концепция гибкого производственного модуля (ГПМ, cell manufacturing/production system) [CMS]. Согласно концепции ГПМ, производственный модуль – самодостаточное подразделение производства, на которое возложена ответственность за значительную часть создания готовой детали. ГПМ имеет в своем составе все необходимые станки, включая роботов, которые должны обладать возможностью исполнения различных операций, включая автоматическую смену рабочего инструмента. ГПМ может дополняться концепцией «Индустрии 4.0» и «Промышленный интернет» за счет связи реального производства и виртуальной реальности. «Промышленный интернет» в свою очередь также делает возможным получение телеметрии в ходе выполнения производственных операций в режиме он-лайн и выполнение необходимых корректировок производственных процессов.

Примером такого производства может служить фабрика автозавода “Tesla” [Tesla] в городе Фремонт (США). В производстве используется более 160 промышленных роботов. Дополнительной отличительной чертой завода является широкое использование принципа «Materials-to-People», согласно которому заготовки автомобилей перемещаются по цеху с помощью специальных колесных автономных платформ. Подобная конструкция завода делает возможным перенастройку производства или отдельных линий в оперативном режиме при необходимости изменения конфигурации изделий.

Европейский исследовательский проект консорциума из восемнадцати университетов и промышленных предприятий «Завод за один день» (Factory-in-a-day) [FiD] имеет своей целью максимальное сокращение (в перспективе до нуля) первоначальных затрат малых и

средних предприятий по оснащению заводов робототехникой и автоматизированными производственными или сборочными линиями.

Использование промышленных робототехнических технологий в малом и среднем бизнесе

Усиление борьбы за повышение конкурентоспособности малого и среднего бизнеса в экономически развитых странах способствует появлению промышленных роботов, обладающих одним или двумя манипуляторами, и пригодными для использования на малых и средних предприятиях на линиях сборки или упаковки продукции. Такие роботы соответствуют всем необходимым требованиям промышленной безопасности и способны работать рядом с людьми, удовлетворяя требованиям необходимых стандартов, в частности, Machinery Directive и Low Voltage Directive [LV]. Таким роботам не нужна специальная зона безопасности, так как они обладают рядом сенсоров, обычно на основе дешевых ультразвуковых сонаров, позволяющим определить наличие посторонних объектов рядом с роботом. Общий класс таких роботов, имеющих достаточную степень безопасности для работы в совместном с людьми пространстве называют ко-роботами. В настоящий момент уже есть обоснованные исследования рентабельности применения промышленных роботов для малых предприятий. В частности, робот Baxter имеет стоимость владения менее одного доллара в час, из расчета использования круглые сутки в течение 6 дней в неделю в течение трех лет [Baxt1]. Сокращение затрат предприятий на рабочую силу и повышение производительности труда (производство большего количества продукции за счет меньшего количества усилий) является основным экономическим драйвером такого проникновения. Однако во многих исследованных бизнес-кейсах упоминается также повышение «эластичности» производственных мощностей за счет гибкой адаптации по сезонным или экономическим изменениям спроса на продукцию.

Разработка интуитивно понятных пользователям систем управления промышленными РТК, упрощающих первоначальную инсталляцию или перенастройку и не требующих персонала, прошедшего длительное дорогостоящее обучение или услуг специализированной компании. На последней выставке AUTOMATICA-2014 практически все крупные поставщики промышленных роботов показали такие системы управления, работающие по принципу Plug-and-Play²⁴.

Примеры зарубежных проектов в области промышленной и сервисной робототехники

²⁴ <http://www.therobotreport.com/news/top-10-take-aways-from-automatica-2014> (№7)

Датская компания Universal Robot является одним из новых игроков на рынке промышленной автоматизации и робототехники – основана в 2003 году. Получив поддержку от государства в виде инвестиций в 2008 г. в размере 1,34 млн долларов компания начала производство коллаборативных роботов, предназначенных для малых и средних предприятий. Основные инновации Universal Robot сосредоточены в системе управления движением промышленного манипулятора, обладающего необходимой степенью безопасности для людей, находящихся в непосредственной близости от робота. Легкость пуска и переналадки обеспечивает быструю окупаемость для малого и среднего бизнеса.

Основа линейки промышленных роботов UR5 и UR10 – шестиосные манипуляторы, грузоподъемностью 5 и 10 кг соответственно. Манипуляторы могут использоваться с различными головными частями, установка которых может проводиться независимым интегратором в зависимости от операционных задач. В частности, для завода по изготовлению пластиковых уплотнителей для автопроизводителей в Треллеборге, на манипуляторы UR5 были установлены захваты, созданные компанией Schunk. Интегратором, привлеченным к модернизации предприятия, была создана операционная модель гибких производственных модулей, которые подразумевали действия одного рабочего с одним манипулятором и восемью станками с ЧПУ одновременно. До внедрения роботов один человек в подобной ячейке мог обслуживать только три станка одновременно. Интересно, что в описанном примере компания не сократила ни одного рабочего, но смогла многократно увеличить выпуск продукции и расширить долю рынка.

Ко-робот «Baxter»

Данный ко-робот разработан компанией Rethink Robotics, созданной Родни Бруком, выходцем из другой крупной робототехнической компании iRobot. Продажи робота начались в конце 2012 года. Стоимость робота составляет \$22 000 в начальной комплектации. Отличительными особенностями этого ко-робота являются:

- Возможность ввода в эксплуатацию в течение часа после доставки.
- Возможность обучения робота новым операциям с помощью тактильного обучения. Человеку достаточно лишь выполнить вместе с роботом ряд действий. Baxter имеет пять встроенных камер для распознавания действий человека при обучении.

Высокий уровень безопасности для человека достигается за счет активной и пассивной систем безопасности. Активная система безопасности включает в себя ультразвуковые датчики, передающие сигналы о близких посторонних объектах. Пассивная система безопасности *Baxter* имеет силомоментные приводы на пружинах, что делает их движения более эластичными – при столкновении с препятствием не происходит значительного соударения. Кроме того, *Baxter* спроектирован специально, чтобы не иметь острых, выдающихся углов и деталей – это делает его более безопасным, чем традиционные промышленные РТК.

Точное число проданных машин не раскрывается компанией, однако, по данным автора, основные покупатели в настоящий момент – исследовательские и учебные центры робототехники. Число инсталляций в производственных компаниях пока остается незначительным.

Ключевыми отличиями *Baxter* от робота из предыдущего примера являются возможность самостоятельной настройки робота на производстве прямо из коробки без специальных навыков. Кроме того, робот может обучаться и без перепрограммирования с помощью графического интерфейса – робот может запоминать движения, которые выполняет человек его манипулятором и потом повторять неоднократно, постоянно улучшая точность работы.

Промышленными ко-роботами, имеющих два манипулятора, занимаются и другие компании. Не так давно лидер рынка промышленной робототехники шведская компания *ABB* представила также пилотный образец двурукого робота «Юми» – *Dual Arm Concept Robot [DACR]*, имеющего 14 степеней свободы и выполняющего ряд операций, которые недоступны текущему поколению промышленных роботов. По заявлению *ABB*, данный робот обладает необходимыми сенсорами, основанными на распознавании видео-изображения, которые делают нахождение людей рядом с роботом полностью безопасным. Компания планирует начать продажи этого в апреле 2015 года.

Роботизированные горно-транспортные комплексы и проект компании Rio Tinto “Mine Of The Future”

Разработка и внедрение в добывающий процесс роботизированных горно-транспортных комплексов (ГТК) и в целом автоматизация горно-добывающих работ для максимизации операционной эффективности производств является важнейшим приоритетом стратегического развития мировых лидеров отрасли добычи – *BHP Billiton*,

Rio Tinto и др. По оценкам исследователей²⁵ и разработчиков робототехники общая экономия от внедрения сервисной робототехники в горнодобывающие работы составляет примерно 15-20%.

Основными преимуществами применения роботизированных ГТК с использованием роботизированной техники являются:

- Сокращение затрат за счет высвобождения и переквалификации рабочей силы до 10%²⁶.
- Существенное повышение производительности работы карьерных автосамосвалов, за счет устранения нетехнологических простоев (пересменка, перерыв на обед, человеческие нужды), КТГ существенно возрастает, меняется технология использования автосамосвалов. Роботизированные автосамосвалы работают от ТО до ТО без деления на смены по 8 часов. Сокращение затрат связанных с ТО и увеличением времени работы машины от ТО до ТО может достигать 12%²⁷.
- Уменьшение износа шин (до 12%)²⁸.
- Повышение безопасности горных работ за счет устранения человека из зоны горных работ;
- Возможность быстрого изменения маршрутизации техники на карьере, так как нет необходимости в перемещении водителей от одной машины к другой;
- Обработка и анализ дополнительной информации с сенсоров машин для оптимизации горных работ (big data, industrial internet);
- Возможность преодолеть недостаток квалифицированных кадров, свойственный для всех добывающих отраслей²⁹.
- Возможность сократить капитальные затраты на строительство социальной инфраструктуры при Greenfield проектах – проектирование новых месторождений, к примеру Эльгинский Угольный Комплекс или другие (необходимо построить поселок с инфраструктурой не на 5000 человек, а на 500). Некоторые аналитики указывают, что такое жилье может стоить до 1 млн долларов США на рабочего.
- Возможность вести горные работы в условиях, где запрещено присутствие людей регулирующими органами (крутые борта карьеров, и есть ограничение на работу

²⁵ <http://www.arisplex.com/analysis/rio-tinto-leads-others-follow-rad-fully-automated-mining/>

²⁶ Parreira, J.; Meech, J.: Autonomous Haulage Systems – Justification and Opportunity. Autonomous and Intelligent Systems. Lecture Notes in Computer Science, 6752 (2011), pp. 63-72

²⁷ там же

²⁸ там же

²⁹ <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/cf831e0c-006f-11e4-a3f2-00144feab7de.html#axzz3EOvmWJC9>

людей, а вести открытые горные работы эффективней, нежели чем уходить под землю).

Программа Rio Tinto “Mine Of The Future” поэтапно реализуется с 2008 года совместно с производителем тяжелой техники Komatsu и рядом других вендоров³⁰. На первом этапе был реализован проект AutoHaul™ по полной автономизации грузового поезда частной железнодорожной линии Rio Tinto общей длиной примерно 1 300 км. Стоимость проекта составила \$518 млн^{31,32}. В 2010 году был введен в строй центр операционного управления карьером Пилбара (одино из крупнейших мировых месторождений железной руды³³) и начались испытания технологий автономных карьерных самосвалов и автоматизированным систем бурения. Начиная с 2012 началось промышленное внедрение автономных карьерных самосвалов (поставщик самосвалов – Komatsu). В настоящий момент все задействованные в проекте машины работают в режиме автономного передвижения на основе GPS/ГЛОНАСС-навигации в дифференциальном режиме (точность позиционирования до 10 сантиметров) с помощью базовой (уточняющей станции GPS). В настоящий момент в карьере Пилбара работает 53 автономных карьерных самосвала. В дальнейшем, в проекте «Mine of The Future» их число будет доведено до 150.

В общем виде автономные технологии в горно-транспортных комплексах реализуются с помощью системы, имеющей следующие элементы:

- Бортовые системы: комплекс управления движением самосвалом (или другой техникой) с помощью электро- и гидро-приводов; комплекс автономной навигации включает в себя подсистему обнаружения препятствий (комплексирование данных с использованием лазерных дальномеров), подсистему позиционирования (с использованием высокоточных GPS-приемников), систему видеонаблюдения и телеуправления; комплекс инерциальной навигации, включающий средства контроля положения руля и колес; комплекс связи с центром операционного управления; комплекс сбора диагностической информации и передачи телеметрии в центр управления.
- Централизованные системы (находятся в центре управления): комплекс контроля, планирования и управления движением; комплекс анализа данных; хранилище

³⁰ http://www.riotinto.com/documents/Mine_of_The_Future_Brochure.pdf

³¹ <http://2.bp.blogspot.com/-VU0cdrVYk7U/UYb-i0ZZ3XI/AAAAAAAAKaY/FVKmGooFnOk/s1600/autotrainedrills.png>

³² <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/1c799b4a-5cf9-11e1-ac80-00144feabdc0.html#axzz3EOvmWJC9>

³³ там же

цифровых карт; модуль постоянного обновления цифровых карт карьерных уступов на основе маркшейдерских данных и треков самосвала.

- Радиосеть в диапазоне 2.4 и 5 ГГц с пропускной способностью не менее 400 Мбит/с.

2.3.5 Перспективные направления и мировые центры разработок в области промышленной и сервисной робототехники

Отчет SPARC³⁴, подготовленный в рамках европейской программы Horizon 2020, использует кластерный подход к технологиям для выделения основных направлений исследований в области промышленной и сервисной робототехники. Выделяются четыре основных кластера технологий, которые могут произвольным образом комбинироваться:

- Совершенствование методов разработки систем и конструирования робототехнических систем. Робототехнические комплексы – сложные технические системы, имеющие множество динамически связанных компонентов. Для их создания требуются эффективные и надежные средства разработки архитектуры, конструирования, дизайна, моделирования и прототипирования новых РТК;
- Совершенствование человеко-машинного взаимодействия, коллаборативная робототехника. Предполагается, что следующее поколение РТК будет взаимодействовать с человеком, пользователем, напрямую, без использования сложных средств программирования, понимая естественные способы коммуникации с человеком – речь, жесты и, возможно, нейроинтерфейсы. К этому же направлению следует отнести исследования по использованию возможностей «интернета вещей» для робототехники, «облачной робототехники» - распределяя максимально эффективным образом обработку информации между центром управления и бортовыми комплексами робота.
- Совершенствование степени автономности роботов. Это включает в себя повышение степени осознания роботом обстановки вокруг него и динамическое планирование действий в недетерминированной среде, или иными словами – интеллектуализация робототехники.
- Совершенствование форм и базовых технологий мехатроники. Способность эффективно выполнять свою миссию во многом зависит от того, насколько эффективно реализована мехатронная часть РТК, контроллеры, сенсоры, приводы, энергоснабжение и энергопотребление. Также к этому технологическому кластеру

³⁴ http://www.eu-robotics.net/cms/upload/PPP/SRA2020_SPARC.pdf

относятся технологии коммуникации между центром управления и РТК или группой РТК.

По данным The Robot Report³⁵ в мире насчитывается 3 065 организаций, деятельность которых можно напрямую отнести к созданию робототехники (Диаграмма 9).

Диаграмма. 9. Количество организаций занимающихся робототехникой (октябрь, 2014)



На представленной на сайте карте³⁶ можно видеть, что большинство компаний, занимающихся робототехнической тематикой располагаются в США, Европейском Союзе и Китае – интеллектуальный капитал в этих регионах очень высок. Именно это побуждает национальные правительства к стимулированию инноваций, исследований и разработок в области модернизации промышленного производства в целом и робототехники, в частности. Правительства стран этих регионов в течение 2013-2014 гг. разработали или объявили о разработке стратегических программ развития и поддержки национальных робототехнических отраслей. В таблице 4 собраны данные об основных известных национальных программах развития робототехнической отрасли.

Таблица 4. Государственные программы развития робототехники в развитых странах.

Страна	Название	Год	Основные направления	Оценка инвестиций
США	National Robotics Initiative ³⁷	2011	Цифровое производство, медицина и здравоохранение, сервисная, космическая и военная робототехника.	Примерно \$500млн на робототехнику из \$2.2 млрд евро до 2020 г. На цифровое производство. На текущий момент

³⁵ <http://www.therobotreport.com/directory>

³⁶ <http://www.therobotreport.com/map>

³⁷ http://nsfmanufacturingfaculty.eng.usf.edu/index.htm_files/NSF%20NRI%20Overview%20for%20AMP.pdf

			Поддержка за счет исследовательских грантов	профинансировано проектов на примерно \$100 млн
Европейский Союз	SPARC ³⁸	2014	Промышленная, сервисная, робототехника	€2.8 млрд, из них €700 млн государственные гранты, €2.1 млрд – частные инвестиции
Франция	France Robots Initiative ³⁹	2014	Все области гражданской робототехники	100 млн евро, поддержка проектов через гранты на исследования и субсидии на модернизацию производств.
Великобритания	Robotics and Autonomous System ⁴⁰	2014	Интеллектуальная робототехника и автономные транспортные системы	£158 млн на поддержку исследований и разработок
Япония	Robot Revolution ⁴¹	2014	Промышленная и сервисная робототехника, фокусировка на персональной робототехнике для заботы о пожилых	Идет разработка программы. Анонсирована Олимпиада по робототехнике в 2020 г.
Китай ⁴²	Программа модернизации промышленности области Чжецзян ⁴³	2013	Автоматизация и роботизация промышленности одного региона	\$82 млрд в течении пяти лет
Южная Корея	Intelligent Robot Development	2014	Основная цель программы – стимулирование спроса на робототехническую	KWN 2.6 трл в 2014-2018 гг

³⁸ <http://sparc-robotics.eu>

³⁹ <http://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/20130320.OBS2467/france-robots-initiative-un-plan-de-soutien-a-la-filiere-robotique.html>

⁴⁰ <http://www.roboticsbusinessreview.com/article/ras-2020-the-257m-plan-to-jumpstart-uk-robotics>

⁴¹ http://japan.kantei.go.jp/96_abe/actions/201409/11article4.html и http://japan.kantei.go.jp/96_abe/actions/201406/19robot.html

⁴² Данные по всему Китаю не представлены, однако, о масштабе вложений можно судить по программе роботизации промышленности одной области.

⁴³ http://www.chinadaily.com.cn/china/2013-11/14/content_17103496.htm

	and Distribution Promotion Act ⁴⁴		продукцию национальных производителей	
--	--	--	---------------------------------------	--

2.3.6 Состояние российской промышленной и сервисной робототехники

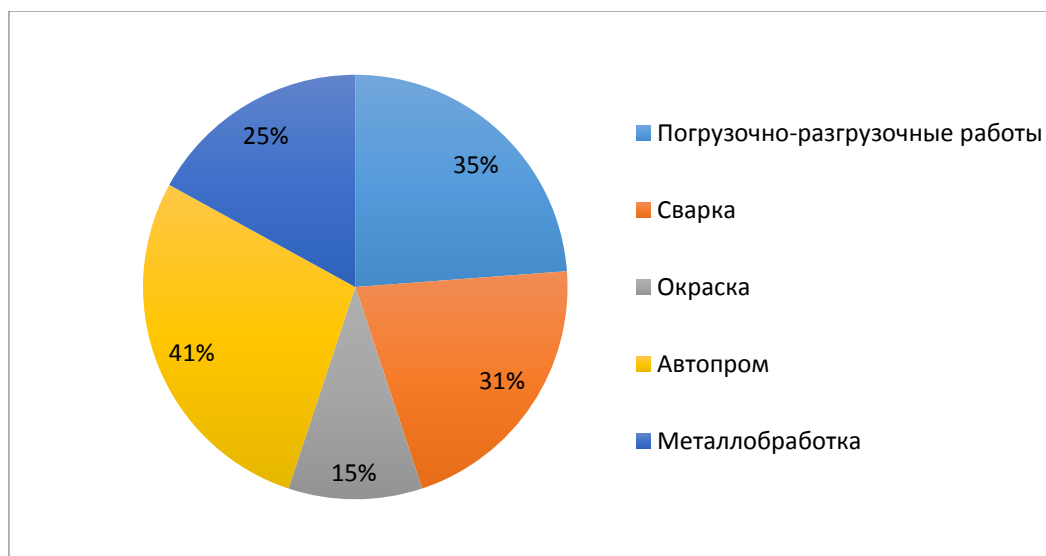
По данным мониторинга МФР в 2013 году в российской промышленности было внедрено 615 робототехнических комплексов (увеличение 34% по сравнению с 2012 г). Общее число промышленных роботов, установленных в Российской Федерации составило 2 400 штук. Распределение между секторами производства показано на Диаграмме 10.

Текущее значение плотности роботизации промышленности в Российской Федерации составило 2 РТК на 10 000 занятых, что в 31 раз меньше мирового уровня (62).

Отставание российской промышленности по степени роботизации безусловно представляет существенную угрозу, но одновременно создает и возможности по роботизации производства и существенному повышению его эффективности.

В России достаточно много и крупных научных центров, вузов и частных компаний, проводящих исследования и разработки в области робототехники, в таблице *** приведен список таких организаций.

В списке 127 компаний, многие из которых имеют проекты и продукты мирового уровня. К примеру, в «Сколково» создан центр робототехники, который объединяет свыше 30 проектов. Многие из этих проектов уже вывели на рынок серийные или предсерийные образцы.



⁴⁴ http://www.motie.go.kr/language/eng/news/news_view.jsp?seq=1270&srchType=1&srchWord=&tableNm=E_01_01&pageNo=2&ctx=

Диаграмма 10. Распределение промышленных роботов по секторам промышленности в Российской Федерации⁴⁵

Таблица ***. Список российских организаций, работающих в области исследований и разработок в области промышленной и сервисной робототехники

Название	Вид	Профиль	Город, РФ
ФГБУ ВНИИПО МЧС России	Государственный научный центр	Наземная робототехника	Балашиха
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»	Государственный научный центр	Воздушная робототехника	Воронеж
ОАО ТМЗ «Агат»	Частная компания	Воздушная робототехника	Гаврилов-Ям
ОАО «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики»	Частная компания	Воздушная робототехника	Долгопрудный
ОАО «Энергия»	Частная компания	Базовые технологии робототехника	Елец
ООО «СМП Роботикс» »	Частная компания	Наземная робототехника Сервисная робототехника	Зеленоград
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Зеленоград
ООО «Финко»	Частная компания	Воздушная робототехника	Ижевск
ОАО «Ижевский радиозавод» (ОАО «ИРЗ»)	Частная компания	Наземная робототехника	Ижевск
ОАО «Научно-исследовательский технологический институт «Прогресс»	Частная компания	Наземная робототехника	Ижевск
ООО «ЦСТ»	Частная компания	Воздушная робототехника	Ижевск
ЗАО «Эникс»	Частная компания	Воздушная робототехника	Казань
ОАО «Теплоконтроль»	Частная компания	Воздушная робототехника	Казань
ООО «Эйдос-Медицина»	Частная компания	Сервисная робототехника	Казань
ООО «Эйдос-Робототехника» »	Частная компания	Сервисная робототехника	Казань
ОАО «Завод имени В.А.Дегтярева»	Частная компания	Наземная робототехника	Коворов

⁴⁵ Данные МФР, 2014

ООО «СпецРобот»	Частная компания	Наземная робототехника	Ковров
ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал» (ОАО «ВНИИ «Сигнал»)	Частная компания	Наземная робототехника	Ковров
ОАО «НПО «Андроидная робототехника»	Частная компания	Сервисная робототехника	Магнитогорск
ООО «Аэроб»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ООО «ВижнЛабс»	Частная компания	Сервисная и промышленная робототехника	Москва
ООО «Вист Майнинг Технолоджи»	Частная Компания	Промышленная робототехника, сервисная робототехника, наземная робототехника	Москва
ООО «Викрон»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
Госкорпорация по атомной энергии «Росатом»	Государственная корпорация	Наземная робототехника, воздушная робототехника, Морская робототехника, Базовые технологии робототехники	Москва
ЗАО "СЭТ-1	Частная компания	Наземная робототехника	Москва
ЗАО«Конструкторское бюро навигационных систем» (ЗАО «КБ НАВИС»)	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ЗАО «КРОК ИНКОРПОРЕЙТЕД»	Частная компания	Наземная робототехника	Москва
ЗАО «МЦСТ»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ЗАО «Научно-исследовательский институт систем связи, автоматизации и управления» (ЗАО НИИ ССИАУ)	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ЗАО «РОСС»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ЗАО «Центр перспективных технологий и аппаратуры (ЗАО «ЦПТА»)	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ЗАО «Экзороботикс»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ЗАО «Рбот»	Частная компания	Сервисная	Москва

		робототехника	
ООО «Инновационные Технологии»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
Лаборатория автономных систем «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ)	Высшее учебное заведение	Воздушная робототехника	Москва
ООО «Лаборатория Интеллектуальных Технологий ЛИНТЕХ»	Частная компания	Сервисная и промышленная робототехника	Москва
ООО «МИРП - Интеллектуальные Системы»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
ООО «НавиРобот»	компания	Сервисная робототехника	Москва
ООО «Наносемантика»	компания	Сервисная робототехника	Москва
Научно-исследовательский институт специального машиностроения Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана»	Высшее учебное заведение	Наземная робототехника	Москва
Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ имени Н.Э.Баумана (НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э.Баумана)	Высшее учебное заведение	Наземная робототехника	Москва
ОАО «НПО "Орбитальные системы"»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
ООО «ЗАЛА АЭРО»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ООО «Инженерно-технический центр «Профессиональные радио системы» ООО «ИТЦ «ПРС»)	Частная компания	Наземная робототехника	Москва
ООО «Когнитивные технологии»	Частная компания	Наземная робототехника, Базовые технологии робототехники	Москва
ООО «Лаборатория проектирования сверхмалых космических аппаратов «Астрономикон»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ООО «Руспром»	Частная компания	Наземная робототехника	Москва
ООО «Сервосила»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ООО «СпиртПриборСервис»	Частная компания	Наземная	Москва

		робототехника	
ОАО Московское конструкторское бюро "КОМПАС"	Частная компания	Морская робототехника	Москва
ОАО «Институт электронных управляющих машин имени И.С.Брука» («ИНЭУМ им. И.С.Брука»)	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ОАО «Компания Сухой»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Москва
ОАО «Концерн «Радиоэлектронные технологии» (ОАО «КРЭТ»)	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ОАО «Московский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский радиотехнический институт» (ОАО «МНИРТИ»)	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ООО «РАЙД ТерраЛинк»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ООО «РобоСиВи»	Частная компания	Воздушная робототехника	Москва
ООО «Сибо Тек»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
ООО «ТОЙТЕМИК Инвеншенс»	Частная компания	Сервисная робототехника	Москва
ООО «Транизист-Видео»	Частная компания	Наземная робототехника Воздушная робототехника	Москва
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Москва
Юго-Западный государственный университет	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Москва
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)	Государственный научный центр	Воздушная робототехника	Москва
Институт проблем управления имени В.А.Трапезникова Российской академии наук	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Москва
Федеральное казенное учреждение «Центр стратегических исследований гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным	Государственный научный центр	Наземная робототехника	Москва

ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Центр стратегических исследований МЧС России)			
ООО «Научно-производственное предприятие «Технопрактика»	Частная компания	Наземная компания	Москва
ООО «НПЦ "Биомедицинские технологии"»	Частная компания	Сервисная робототехника	Нальчик
Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Нальчик
ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова» (ОАО «ОКБМ Африкантова»)	Частная компания	Наземная робототехника	Нижний Новгород
ОАО «ЦНИИ «Буревестник»	Частная компания	Наземная робототехника	Нижний Новгород
ОАО "Уральское конструкторское бюро транспортного машиностроения" (ОАО «УКБТМ»)	Частная компания	Наземная робототехника	Нижний Тагил
ОАО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э.Дзержинского» ((ОАО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод»),	Частная компания	Наземная робототехника	Нижний Тагил
ЗАО «СофтЛаб-НСК»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Новосибирск
ЗАО «Мультиспектр»	Частная компания	Наземная робототехника	Реутов
НИИ «Спецвузавтоматика»	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Ростов-на-Дону
Южный федеральный университет	Государственный научный центр	Базовые технологии робототехники	Ростов-на-Дону
ООО «КБ Аврора»	Частная компания	Сервисная робототехника, Наземная робототехника	Рязань
ЗАО «Научно производственное объединение «Современные пожарные технологии» (ЗАО «НПО СОПОТ»)	Частная компания	Наземная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Компьютерная робототехника»	Частная компания	Промышленная	Санкт-Петербург
Международный научно-образовательный центр «ВС АиВТ» Санкт-Петербургского	Высшее учебное заведение	Базовые технологии робототехники	Санкт-Петербург

государственного политехнического университета (МНОЦ «ВС АиВТ» СПбПУ)			
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» («ЦНИИ РТК»)	Государственный научный центр	Наземная робототехника	Санкт-Петербург
ЗАО «Транзас»	Частная компания	Воздушная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Икстурион»	Частная компания	Сервисная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Кибернетические Технологии Лабс»	Частная компания	Сервисная робототехника	Санкт-Петербург
ООО«Образовательная робототехника»	Частная компания	Сервисная робототехника	Санкт-Петербург
ОАО «Научно-производственное объединение «Карат» (ОАО «НПО «Карат»)	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Санкт-Петербург
ОАО НПФ «Меридиан»	Частная компания	Наземная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Роботроника»	Частная компания	Сервисная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Титан-информационный сервис»	Частная компания	Сервисная робототехника	Санкт-Петербург
Федерально государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем» (ФГУП «ГосНИИПП»	Государственный научный центр	Наземная робототехника	Санкт-Петербург
ООО «Анфас СкБ»	Частная компания	Промышленная робототехника, Сервисная робототехника, Базовые компоненты робототехники	Саратов
ООО «Европа MeMіc»	Частная компания	Сервисная робототехника	Свердловская обл., Екатеринбург
ЗАО "НИИ современных телекоммуникационных технологий" (ЗАО "НИИ СТТ")	Частная компания	Наземная робототехника, Базовые технологии	Смоленск

		робототехники	
ООО «Лаборатория автоматизации проектирования»	Частная компания	Промышленная робототехника	Таганрог
ОАО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем» (ОАО НКБ ВС)	Частная компания	Наземная робототехника	Таганрог
ОАО Специализированный научно-технический центр «Полус» (ОАО «СНТЦ «Полус»)	Частная компания	Воздушная робототехника	Томск
ОАО «Уральский завод гражданской авиации» (ОАО «УЗГА»)	Частная компания	Воздушная робототехника	Урал
ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт релестроения с опытным производством» ОАО «ВНИИР-Прогресс»)	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Чебоксары
ОП «Научно-производственный комплекс «ЭЛАРА» имени Г.А.Ильенко» (ОАО «ЭЛАРА»)	Частная компания	Воздушная робототехника	Чебоксары
ОАО «Научно-производственное объединение «Электромашина» (ОАО НПО «Электромашина»)	Частная компания	Наземная робототехника	Челябинск
ООО «Малленом Системс»	Частная компания	Базовые технологии робототехники	Череповец
ООО «ПромСервис»	Частная компания	Воздушная робототехника	Щелково

2.3.7 Список литературы

[Pew] - <https://www.evernote.com/shard/s53/sh/69ec7b8d-85e3-4f55-9cf1-7414396bc144/5b561fe6476041822d71cb27746cddb2>

[McK1] - http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies

[Кут] - Презентация Н. Кутеева (Российское технологическое агентство) в ходе Круглого стола « Государственная поддержка Робототехнической отрасли в России» на форуме Иннопром-2014 в Екатеринбурге

[SPARC1] - Прогноз <http://sparc-robotics.eu>

[Abe] - <http://news.asiaone.com/news/asia/abenomics-robonomics?nopaging=1>

[FT1] - <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/b42e4e34-0bfa-11e3-8840-00144feabdc0.html>

[WRbt 2014] - World Robotics 2014. Service Robots, P 21-25, Table 2.1-2.2

[IFR] - <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>

[App] - <http://seekingalpha.com/article/658711-apple-s-revolutionary-move-into-robotic-manufacturing>

[II] - Erik Brynjolfsson, Andrew McAfee, The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies,

[LIAA] - <http://www.project-leanautomation.eu>

[CMS] - Automation for Lower Volume Parts. Methods Machine Tools, Inc. John Lucier, Automation Manager. IMTS2014 Conference. September 9, 2014. Chicago, USA.

[Tesla] - http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Factory

[FiD] - <http://www.factory-in-a-day.eu>

[LV]

- http://media1.limitless.dk/UR_Manual/UR5_Safety_Manual/UR5_Safety_Manual_GB.pdf

[Baxt] - <http://web.stanford.edu/class/ee204/Publications/Rethink%20Robotics%202013-204-1.pdf>

[DACR] - <http://youtu.be/uOwAloWcxdU>

2.4 Аддитивное производство

2.4.1 Основные определения и рынки аддитивного производства

Аддитивное производство (АП, также АМ — от англ. *additive manufacturing*) представляет собой класс перспективных технологий кастомизированного производства деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала (как правило, послойного) — в противоположность так называемому *вычитающему производству* (например, традиционной механической обработке) [1]. Детали изготавливаются непосредственно по компьютерному файлу, содержащему 3D-модель, виртуально нарезанную на тонкие слои, который передается в АП-систему, для послойного формирования конечного изделия. АП-технологии обеспечивают гибкость, позволяющее быстрое производство сложной кастомизированной продукции и запасных частей, которые либо не могут быть изготовлены с помощью традиционных производственных технологий, либо требуются в малых объемах. Сложная конфигурация (например, наличие в детали внутренних каналов охлаждения), которую нельзя получить станочной обработкой, может быть легко воспроизведена селективным нанесением

материала. К преимуществам цифровых моделей относится не только произвольность формы, но и возможность их моментальной передачи в любую точку мира, что позволяет организовать локальное производство в мировых масштабах. Еще одной важной особенностью технологий АП является близость получаемой формы изделия к заданной, что существенно сокращает расходы материала и отходы производства. Совместное исследование European Aeronautic Defense and Space Company (Бристоль, Великобритания) и EOS Innovation Center (Уорвик, Великобритания) показало, что экономия сырья при АП может достигать 75% [2]. Благодаря всем этим качествам, АП, в сравнении с традиционными производственными технологиями, обладает значительным потенциалом в том, что касается сокращения затрат, энергосбережения и снижения вредных выбросов в атмосферу.

Уникальные возможности АП обеспечивают следующие преимущества [3]:

- сокращение сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;
- возможность и экономическая целесообразность мелкосерийного производства;
- оперативные изменения в проекте на этапе производства;
- функциональная оптимизация продукции (например, реализация оптимальной формы каналов охлаждения);
- экономическая целесообразность производства кастомизированной продукции;
- сокращение потерь и отходов производства ;
- возможности для упрощения логистики, сокращения времени поставок, уменьшения объемов складских запасов;
- персонализация дизайна.

Несмотря на то, что на протяжении последних 20 лет, АП рассматривается как новая перспективная технология и демонстрирует годовой темп роста 26%, его история насчитывает 150 лет, уходя корнями в такие области, как фотоскульптура и топография [4]. У истоков современного АП, одним из наиболее известным методом которого служит стереолитография (SL, от англ. *stereolithography*), стоит подход, предложенный в 1951 году Мюнцем (Munz). Система Мюнца использовала поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отвердевания фотополимера по сечениям сканируемого объекта. В 1986 году, компания 3D Systems начала промышленное использование стереолитографии. Примерно в то же время были разработаны методы АП с использованием нагрева лазерным и электронным лучом. Эти методы были внедрены в

производство в 1990-х гг., позволив использовать АП для изготовления металлических объектов [4]. Согласно отчету Королевской инженерной академии наук Великобритании за 2013 г., скачок в развитие технологий АП произошел в 2009 г., когда истек срок действия одного из ключевых патентов. Этот патент касался метода изготовления объектов путем послойной наплавки (FDM, *fused deposition modeling*) и описывал выдавливание (экструзию) пластиковой нити, формирующей готовую деталь, с поддерживающей структурой из дополнительных материалов. Истечение срока действия патента сделало возможным радикальное (вплоть до 90%) снижение цен на системы 3D-печати. Это не только открыло рынок 3D-печати для широкого круга потребителей, но и заставило многих производителей и инвесторов пересмотреть свое отношения к АП и связанным с ним возможностям, проблемам и рискам. Представители авиационно-космической промышленности, автомобилестроения, и даже архитекторы и строители увидели в АП перспективный инструмент для решения своих задач.

С первых же лет своего существования, развитие АП сопровождалось ажиотажем и завышенными ожиданиями. По оценкам компании Gartner (2012 г), в настоящий момент, 3D-печать находится на пике «завышенных ожиданий» [6]. Несмотря на то, что многие считают АП-технологии прорывными и ключевыми для третьей промышленной революции [7], пока, их влияние, в терминах мирового производства, остается весьма умеренным.

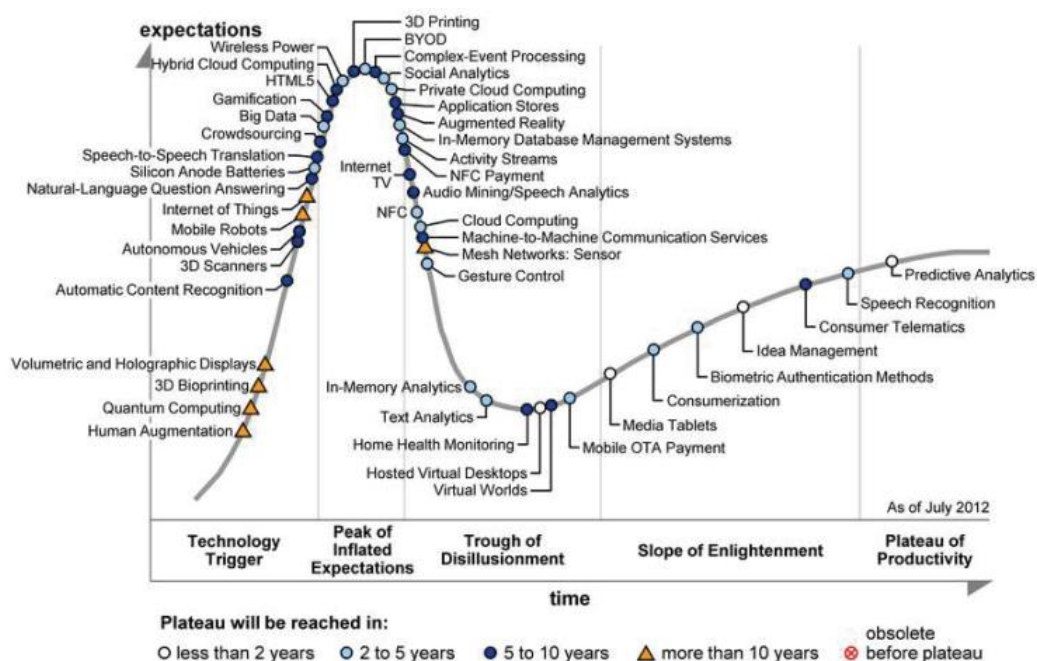


Рис. 1. Цикл зрелости технологий по состоянию на 2012 г., построенный компанией Gartner

Консультант Терри Уолер (Terry Wohler) составляет и поддерживает наиболее полный свод знаний о технологиях АП (www.wohlerassociates.com), а также регулярно публикует отчеты, которые приобрели репутацию наиболее авторитетного источника информации о финансировании, тенденциях, возможностях, коллективных проектах, исследованиях и перспективных технологиях в этой области. Согласно отчету Уолера, опубликованному в ноябре 2013 г., в 2012 г. общемировой сектор продукции и услуг АП показал совокупный годовой прирост 28,6%, что, в пересчете, соответствует рынку объемом \$2,204 млрд. По прогнозам Уолера, к 2021 г. объем рынка АП составит более \$10 млрд. Исследования McKinsey Global Institute свидетельствуют о том, что влияние АП на мировой ВВП может к 2025 г. достичь \$550 млрд в год [9]. Еще одним показателем, который отслеживает Уолер, является количество проданных установок АП. В 2012 г. было продано почти 8000 промышленных систем (с ценой выше \$5,000). В структуре доходов, полученных от производства и услуг в области АП, доля, приходящаяся на изготовление составных частей конечной продукции, выросла практически с нуля в 2003 г. до 28% в 2012 г.

2.4.2 Технологии и оборудование аддитивного производства

За два прошедших десятилетия были разработаны несколько процессов и систем АП, а возможности их применения существенно расширились и сегодня охватывают диапазон от быстрого прототипирования и изготовления простых физических макетов до поддержки в разработке дизайна продукции, создания литейных моделей и, в последнее время, непосредственного производства серийных изделий. В частности, GE Aviation объявил о серийном выпуске топливных форсунок для двигателя LEAP [25, 37]. Первые АП-системы производили изделия преимущественно из полимерных материалов (пластиков), тогда как сегодняшние установки способны производить детали из металла. В аддитивных процессах с использованием металлов, детали формируются путем последовательной послойной наплавки или спекания металлического порошка. Такая возможность привлекательна тем, что позволяет изготовление деталей точной или близкой к заданной формы без инструментальной оснастки с минимальной последующей механообработкой, либо вообще без нее. Это представляет особый интерес для авиационно-космической промышленности и биомедицины, поскольку делает возможным выпуск изделий с высокими эксплуатационными характеристиками при низких общих затратах.

Таблица 1. Процессы АП, сгруппированные по состоянию используемого материала [7]

Состояние	Процесс	Материалы
-----------	---------	-----------

материала		
Жидкое	Стереолитография (SL)	
	Изготовление объектов путем послойной наплавки (FDM)	Полимеры
	Струйная печать (JP)	
Порошкообразное	3D-печать (3DP)	Полимеры, металлы,
	Селективное лазерное спекание (SLS)	керамика
	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	
	Селективная лазерная плавка (SLM)	
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Металлы
	Прямое нанесение металлов (DMD)	
Твердое	Точное лазерное формование (LENS)	
	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM) – листы	Полимеры, металлы, керамика и композитные материалы
	Произвольное экструзионное формование (EFF) – проволока	

Рынок АП-установок делится на три сегмента [4]. Самые высокие темпы роста отмечаются для дешевых 3D-принтеров, ориентированных на создание концептуальных макетов и пригодных для эксплуатации в офисной среде. Второй набор технологий, занимающий промежуточное положение по стоимости, предназначен для создания прототипов деталей с различной степенью точности и/или функциональности. Дешевые и средние по стоимости установки обычно ориентированы на полимерные материалы. Установки высокого класса, составляющих третий сегмент, позволяют производство полимерных, металлических и керамических деталей; их цены варьируются от \$200 000 до \$2 000 000 [4]. Установки высокого класса могут быть оптимизированы в расчете на изготовление крупногабаритных деталей, достижение высокой производительности, использование нескольких материалов, или с любой другой целью, что повышает стоимость системы. К 2013 г. производством и продажей АП-установок занимались 16 компаний в Европе, 7 в Китае, 5 в США и 2 в Японии [8]. К числу ведущих изготовителей систем АП относятся американские компании 3D Systems и ExOne, израильская Stratasys, шведская Arcam, а также немецкие EOS и Voxeljet. По числу смонтированных систем с большим отрывом лидируют США, собравшие у себя 38% промышленных установок.

Значительное количество установок эксплуатируется также в Японии (9,7%), Германии (9,4%) и Китае (8,7%). Доля России составляет 1,4%. Ниже представлен краткий обзор самых распространенных процессов АП

Жидкостные процессы

Стереолитография (SL, Stereolithography)

Процесс стереолитографии, которым был первым АП-процессом, внедренным в промышленное производство, лучше других технологий АП отлажен в том, что касается точности изготовления, контролируемости параметров и понимания его механизма [10]. Этот процесс включает в себя: моделирование детали и преобразование в файл формата STL для создания объемной полигональной сетки и поддерживающей структуры; нарезка трехмерной модели в STL-формате для создания набора сечений; передача рассеченной модели в стереолитографический аппарат (SLA); послойное формирование детали и поддерживающей структуры в ванне со специальным полимером с помощью аргонового лазера, который очерчивает двумерные сечения и приводит к отверждению полимера; удаление поддерживающей структуры и, при необходимости, последующее отверждение детали для окончательной полимеризации посредством управляемого обогрева или в УФ-печи. Стереолитография часто используется для быстрого прототипирования (БП) и быстрого изготовления инструментальной оснастки с целью создания пресс-форм и форм для литья. В последнее время изучаются возможности применения стереолитографии для тканевой инженерии в медицине [11]. Проблемы с долгосрочной стабильностью изготовленных деталей ограничивают возможности использования стереолитографии для серийного производства изделий. Основным ограничением самого процесса является потребность в поддерживающей структуре, что увеличивает расходы материала и удлиняет производственный цикл [12].

Изготовление объектов путем послойной наплавки (FDM, Fused Deposition Modeling)

Как и стереолитография, FDM — один из самых распространенных процессов изготовления концептуальных и функциональных прототипов [13]. Материал расплавляется в разогретом сопле-дозаторе, движениями которого непосредственно управляет программное обеспечение системы автоматизации производства. После экструзии из сопла, материал остывает и затвердевает; изделие формируется последовательным нанесением слоев материала. Поскольку материал нагревается до температуры лишь на 1 °С превышающей температуру плавления, он становится твердым практически сразу после экструзии, соединяясь с предыдущими слоями. Для изготовления

изделий сложной формы с нависающими частями с помощью отдельных сопел создаются поддерживающие структуры (опоры). В качестве материала чаще всего используются полилактид (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик), который облегчает и ускоряет печать благодаря созданию растворимых опор и покрытия, улучшающего качество поверхности. Разрешение и точность модели ограничены диаметром сопла, а скорость изготовления — необходимостью выполнять физические перемещения сопла через рабочую область. Точность изготовления может достигать $\pm 0,05$ мм. Применимость этого процесса ограничивается более слабыми механическими характеристиками и более низким качеством поверхности конечного продукта по сравнению с деталями, изготовленными посредством традиционного литья. Анализ влияния характеристик процесса на эти свойства были посвящены многочисленные исследования [напр., 13-16]. Продукция, полученная посредством процесса FDM, имеет сильно выраженную механическую анизотропию и содержит значительные остаточные термические напряжения, вызывающие деформации, которые влияют на механическую прочность изделий.

Струйная печать (IJP, Inkjet Printing)

Как и стереолитография, струйная печать представляет собой нанесение и отверждение светоотверждаемых полимеров, как правило на основе акрила [3]. Среди коммерческих установок выделяются системы Object Systems и 3D Systems. Эти установки наносят ряд полимерных слоев с помощью печатающих головок, содержащих множество сопел, что позволяет достигать высокой скорости печати, сокращая количество проходов. Каждый слой фотополимера отверждается ультрафиолетовым излучением непосредственно в ходе печати, так что никакого дополнительного отверждения по завершении процесса не требуется. Несмотря на относительно высокую точность и хорошее разрешение этого процесса, полученные изделия, из-за свойств материала, по своим характеристикам проигрывают изделиям полученным традиционными методами. Помимо этого, сфера применения струйной печати ограничена прототипированием и точным литьем из-за недостаточно высокой скорости изготовления деталей, ограниченного выбора материалов и хрупкости конечных изделий.

Порошковые процессы

Селективное лазерное спекание (SLS, Selective Laser Sintering) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS, Direct Metal Laser Sintering)

Процесс SLS подразумевает спекание порошковых материалов с помощью лазера [17, 18]. Как и в случае прочих процессов АП, процесс SLS начинается с подготовки компьютерной модели изделия в системе автоматизированного проектирования (CAD). Затем модель рассекается на тонкие слои, чтобы получить информацию о контуре каждого слоя. В процессе изготовления изделия применяется тонкий порошок, который равномерно распределяется валиком по подставке устройства и выборочно сканируется по контуру лазером с мощностью 25–100 Вт. Толщина слоя, как правило, не превышает 100 мкм. Время засветки каждой частицы лазерным пучком находится в пределах от 0,5 до 25 мс. При столь коротких тепловых циклах спекание порошка в твердом состоянии не происходит, и для достаточно быстрого спекания необходимо частичное или полное расплавление частиц. Процесс не требует построения поддерживающих структур, поскольку нерасплавленный порошок сам служит опорой для модели, а термические напряжения снижаются путем нагрева емкости с порошком. Высококристаллические полимеры (прежде всего нейлоны), спекаемые через полное расплавление частиц, обеспечивают механические свойства, достаточные для конечных изделий. Напротив, аморфные материалы, спекание которых обычно происходит при температуре стеклования, демонстрируют недостаточные прочностные характеристики и поэтому находят применение лишь в быстром прототипировании, в частности при подготовки форм для литья. Процесс DMLS требует использования связующих веществ с температурой плавления ниже, чем у основного металлического компонента. В качестве таких связующих материалов могут использоваться полимерные порошки, которые выжигаются из изделия при последующей обработке, либо металлические порошки с более низкой точкой плавления.

Применяемые лазеры разнообразны — в их число входят лазеры на диоксиде углерода, Nd:YAG-лазер (алюмоиттриевый гранат с примесью неодимия), волоконные лазеры, дисковые лазеры и т. п. [18, 19]. Выбор лазера оказывает существенное влияние на процесс спекания частиц порошка, поскольку степень поглощения лазерного излучения материалом зависит от длины волны излучения, а металлургический механизм спекания определяется плотностью энергии лазера. В отличие от чистых металлов, плавление которых происходит одновременно по всему объему, у легированных металлических порошков есть диапазон температур, в котором в процессе плавления/затвердевания жидкая и твердая фаза сосуществуют. Процесс прямого лазерного спекания легированных порошков, представляющий особый интерес для технологий АП, требует точного контроля параметров лазерной обработки для обеспечения неконгруэнтного плавления

порошка в двухфазной области. Однако характерные для DMLS локализованные быстрые тепловые циклы осложняют точное управление температурой спекания. Эти трудности приводят к недостаточному уплотнению порошка, возникновению гетерогенной микроструктуры и ухудшают свойства изделий из легированных порошков. Поэтому, для получения приемлемых механических свойств, обычно требуется провести последующую обработку, такую как нагрев для повторного спекания, горячее изостатическое прессование или вторичное насыщение материалом с более низкой температурой плавления [19].

Селективная лазерная плавка (SLM, Selective Laser Melting)

Селективная лазерная плавка — это АП-процесс плавления порошка в емкости, подходящий для изготовления металлических, керамических и полимерных изделий [19]. Чаще всего используются металлические порошки с размером зерен в диапазоне 10–40 мкм. Порошок наносится на рабочую платформу распределителем порошка, формирующим слой толщиной 20–40 мкм. Лазер высокой мощности (0,05–1 кВт), под управлением программного обеспечения установки, очерчивает контур и выборочно расплавляет порошок. Процесс повторяется для каждого слоя, до полного формирования изделия. Для лазерной плавки используются те же установки и процедуры, что и в процессе SLS. Единственное отличие селективной лазерной плавки от процесса SLS состоит в том, что в процессе SLM происходит полное расплавление порошка. Это существенно улучшает микроструктуру и характеристики изделия по сравнению с DMLS. Плотность 99,99% для металлических изделий достижима без последующей термической обработки [19], а отчеты показывают, что итоговые характеристики материала сопоставимы с характеристиками деталей, полученных механообработкой. Еще одним преимуществом SLM является возможность работать с чистыми цветными металлами, такими как титан, алюминий и медь, которые вплоть до сегодняшнего дня не поддавались обработке методом DMLS. Однако процесс SLM требует высокой мощности лазера, хорошего качества лазерного пучка и малой толщины порошкового слоя (что означает замедление изготовления). Более того, при затвердевании, детали склонны давать сильную усадку, вызывая значительные остаточные напряжения в изготовленных изделиях; эти остаточные напряжения могут приводить к деформациям и даже расслоениям в конечном продукте.

Для нависающих элементов изделия нужны поддерживающие структуры, а термические напряжения, порождаемые процессом, требуют наличия фиксаторов. Как и в стереолитографическом процессе, создание опор приводит к перерасходу материала и

вынуждает прибегать к последующей чистовой обработке. Чаще всего используются кобальтохромовые и титановые сплавы, сплавы на основе стали и инструментальные стали.

Лазерное нанесение металлов (LMD, Laser Metal Deposition)

Этот метод отличается от DMLS и SLM способом подачи порошка. Система LMD состоит из порошкового питателя, который вводит порошок через сопла в систему подачи газа. Мощный лазерный пучок светит сквозь центр набора сопел и фокусируется вблизи подложки — основы, на которой будет изготовлена деталь. Подложка сканируется в поперечных направлениях, чтобы сформировать требуемую геометрию, а затем происходит послойное нанесение порошка до формирования трехмерного изделия. LMD-система, объединяющая в себе многоосную систему позиционирования, возможность подачи нескольких материалов и (в ряде случаев) патентованную систему управления с обратной связью, может использоваться для изготовления новых деталей, восстановления и ремонта поврежденных или изношенных изделий, а также для нанесения износостойких и антикоррозионных покрытий [19]. Способность подавать нужный материал в нужное место дает LMD-процессу ряд уникальных преимуществ, недоступных процессам SLS/SLM, которые используют емкость с порошком. Процессы прямого нанесения металлов (DMD), точного лазерного формования (LENS) и Directed Light fabrication по сути являются разновидностями технологии LMD.

Электронно-лучевая плавка (EBM, Electron Beam Melting)

Процесс электронно-лучевой плавки был поставлен на коммерческую основу компанией Arcam (Швеция) в 1997 г. Основой процесса является термоэлектронный излучатель, использующий вольфрамовую нить для создания пучка электронов [20, 21]. Сканирующий пучок выборочно плавит металлический порошок (с толщиной слоя 70–250 мкм), вызывая его спекание. Порошок, спекшийся вокруг изделия, обеспечивает опору для поверхностей, направленных книзу, а в процессе постобработки счищается, тем самым сохраняя большую часть не подвергшегося спеканию порошка для повторного использования. Процесс EBM выгодно отличается от лазерных процессов более высокой скоростью сканирования, что сокращает время изготовления изделия, и меньшими термическими напряжениями. Однако круг используемых материалов ограничен проводящими электрический ток металлическими порошками, а качество поверхности изделия уступает результату лазерных процессов. Процесс EBM выполняется в камере с глубоким вакуумом, что делает его довольно затратным, но облегчает работу с

материалами, чувствительными к окислению, что важно, например, для изготовления медицинских имплантатов и в некоторых авиационно-космических приложениях.

Твердотельные процессы

Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM, Laminated Object Modeling)

Система LOM составляет изделие/деталь из листов материала, вырезанных лазером, и скрепляет слои вместе [22]. Для удаления нежелательных остатков материала обычно нужна постобработка, выполняемая ручным инструментом (так называемая «доводка»). Процесс LOM применяется как для быстрого прототипирования, так и для быстрого изготовления инструментальной оснастки. Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в разработке новых полимерных и металлических материалов, этот процесс редко применяется для изготовления конечной продукции. Среди причин такого положения вещей — трудность «доводки», ограниченная точность формирования изделий, неоднородность свойств материала и сложности с копированием и долговечностью мелких особенностей и деталей изделия.

Таблица 2. Источники энергии и характеристики типичного оборудования для аддитивного производства [23]

Установка	Процесс	Рабочее пространство (мм)	Источник энергии	
Емкость с порошком				
ARCAM (A2) (a)	EBM	200 × 200 × 350	Электронный пучок, 7 кВт	
EOS(M280) (b)	DMLS	250 × 250 × 325	Иттербиевый волоконный лазер, 200–400 Вт	
Концепт LaserCusing (M3) (b)	SLM	300 × 350 × 300	Волоконный лазер, 200 Вт	
MTT (SLM 250) (b)	SLM	250 × 250 × 300	Иттербиевый волоконный лазер, 100–400 Вт	
Группа систем Phenix (PXL) (c)	SLM	250 × 250 × 300	Волоконный лазер, 500 Вт	

Renishaw (AM 250) (d)	SLM	245 × 245 × 360	Лазер, 200 или 400 Вт
Realizer (SLM 250) (b)	SLM	250 × 250 × 220	Лазер, 100, 200 или 400 Вт
Matsuura (Lumex Advanced 25) (e)	SLM	250 × 250 в диаметре	Иттербиевый волоконный лазер, 400 Вт
<i>Подача порошка</i>			
Optomec (LENS 850-R) (f)	LENS	900 × 1500 × 900	Волоконный лазер IPG, 1 или 2 кВт
POM DMD (66R) (f)	DMD	3 200 × 3 670 × 360	Волоконный лазер с диодной накачкой или дисковый лазер, 1–5 кВт
Система лазерного отверждения Accufusion (g)	LC	1 000 × 1 000 × 1 000	Nd:YAG-лазер
Лазер Igera (LF 6000) (c)	LD		Лазерное плакирование
Trumpf (b)	LD	600 × 1000 в длину	
Huffman (HC-205) (f)	LD		Плакирование CO ₂ -лазером
<i>Подача проволоки</i>			
Sciaky (NGI) EBFFF (f)	EBDM	760×480 × 500	Сварочный источник тока с мощностью от 40 кВт при напряжении 60 кВ
Система MER произвольной формовки (FFF) посредством селективной сварки плазменной дугой (f)	PTAS FFF	610 × 610 × 5 180	Два источника постоянного тока 350 А для создания плазменной дуги

Энергопотребление и влияние на окружающую среду

Исчерпывающее сравнение АП и других производственных процессов с точки зрения энергопотребления, расходования водных ресурсов, захоронения отходов и использования

первичных материалов проведено в рамках проекта ATKINS [24]. Результаты проекта указывают на то, что с точки зрения влияния на окружающую среду АП имеет явные преимущества, однако энергопотребление этой технологии (13,1 кг CO₂ на изделие) значительно выше показателей для технологий литья (1,9 кг CO₂). Впрочем, другие исследования потребления энергии в различных процессах АП ведут к заметным расхождениям в данных, что указывает на необходимость дальнейшего, более целенаправленного изучения этой проблемы. Аналогичным образом у технологий АП есть значительный потенциал в вопросе снижения выброса парниковых газов посредством оптимизации дизайна изделий и сокращения потерь материала. Результаты проекта ATKINS приводят к заключению, что оптимальный дизайн должен приводить к 40%-ному снижению веса и экономии материала [24]. Выполненный в рамках проекта анализ показывает, что снижение веса магистрального самолета на 100 кг на протяжении всего жизненного цикла влечет за собой экономию \$2,5 млн на топливных расходах и сокращает выбросы углекислого газа на 1,3 млн т. Имеется несколько отчетов по результатам исследований влияния АП на окружающую среду [25–27]. Однако многие вопросы остаются неразрешенными, и точная оценка экологических последствий АП требует дальнейших исследований. В частности, выявление истинных преимуществ и возможных подводных камней в использовании АП-технологий может быть выполнено только в рамках системного подхода к анализу жизненного цикла изделия, произведенного с помощью АП-процесса. При этом очевидно, что наибольший потенциал в вопросах снижения влияния на окружающую среду имеют изделия, спроектированные таким образом, чтобы в полной мере задействовать уникальные возможности по снижению веса, предлагаемые технологиями АП.

2.4.3 Текущие и перспективные применения аддитивного производства

На сегодня преобладающей областью использования АП-процессов остается быстрое прототипирование. Некоторую часть приложений технологии АП составляет также

быстрое изготовление инструментальной оснастки, в частности производство пресс-форм.

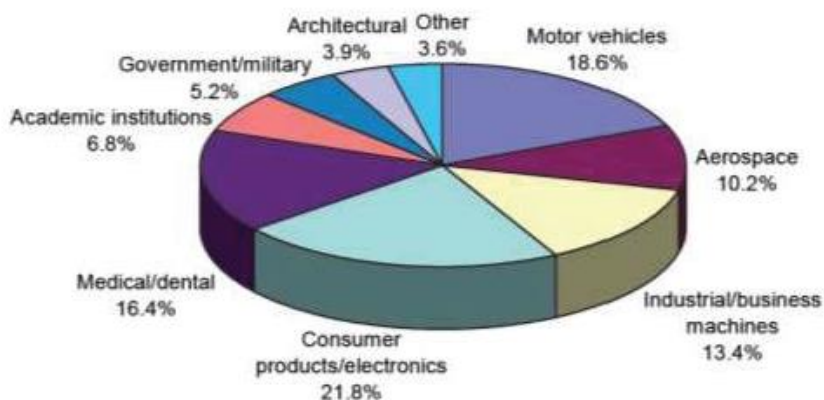


Рис. 2. Доля различных отраслей в структуре доходов поставщиков услуг АП [8]

По мере совершенствования существующих и разработки новых, более развитых технологий АП они находят себе все более широкое применение. Сегодня эти технологии используются для изготовления разнообразной продукции, в том числе медицинских имплантатов, ортопедических и стоматологических изделий, слуховых аппаратов, инструментов для формования, деталей для авиационно-космической, оборонной и автомобильной промышленности, электроники, персонажей видеоигр, произведений искусства, ювелирных изделий, коммерческого освещения, 3D-тканей, пищевых продуктов и многого другого. Исследования по применению АП в биомедицинских приложениях уже подводят нас к задаче создания живых тканей.

Медицина

В медицинских приложениях часто необходимо изготавливать продукцию, персонализированную с точки зрения формы и функций, что обусловлено уникальностью каждого пациента. Технологии АП способны сделать производство персонализированной продукции экономически целесообразным при минимальных компромиссах в дизайне. Другим мотивом использования АП в медицинских приложениях является размер рынка. Медицинские приложения АП-технологий можно разбить на следующие категории:

- Биомоделирование, которое включает в себя изготовление физических моделей анатомического строения человеческого тела и, говоря шире, биологических структур для хирургического тестирования и планирования операций.
- Проектирование и изготовление персонализированных имплантатов для реконструктивных операций, реабилитации и пластической хирургии.
- Производство имплантатов с пористой структурой (матриц) и тканевая инженерия.

- Изготовление специализированных хирургических инструментов и приспособлений.
- Доставка лекарственных средств и изготовление микронных медицинских устройств.

С точки зрения применения АП-технологий эти области находятся на различных стадиях развития: в одних АП уже используется на практике, тогда как в других пока лишь ведутся исследования. Предполагаемый процесс биомоделирования начинается с того, что лечащий врач или хирург запрашивает 3D-сканирование интересующей его области тела пациента с использованием медицинских средств визуализации (напр., МРТ или КТ) [28]. Результаты сканирования обрабатываются и передаются в специализированное программное обеспечение для вычленения нужной анатомической структуры. Полученные данные преобразуются в формат STL и используются АП-установкой для изготовления соответствующего органа или части тела. Имеются отчеты об успешном изготовлении и испытании персонализированных сердечных клапанов [29, 30], искусственных челюстей [31], композитной части коленного сустава [32] и акриловых краниопластических имплантатов, изготовленных методом стереолитографии [33, 34]. С помощью ЕВМ-системы Arcam налажено массовое производство ацетабулярных колпачков, применяемых при протезировании тазобедренного сустава. Использование АП позволяет производить имплантаты с пористой структурой, облегчающей прорастание тканей [8]. Ключевым преимуществом АП-технологий является возможность адаптации технического решения медицинской задачи к индивидуальным данным пациента. В области протезирования АП делает возможным проектирование и изготовление облегченных и недорогих составных протезов (например, руки или кисти), упрощая сборку сложного узла и превращая его в единое изделие [35].

Технологии АП применяются также для серийного производства изделий используемых в стоматологии. Возможность производить однотипную продукцию малыми партиями с минимальными затратами делает АП-технологии эффективными в этой сфере, где каждый клиент выдвигает свои требования. Для стоматологических приложений очень хорошо подходит процесс SLM, поскольку изделия имеют сложную геометрию, требуют значительной индивидуализации и имеют высокую совокупную стоимость [36]. Сверх того, изготовление множества уникальных деталей за один производственный цикл делает возможной массовую кастомизацию продукции.

АП-технологии находят свое применение также в сфере слухового протезирования: два ведущих производителя слуховых инструментов, Siemens и Phonak, применяют системы АП для серийного производства индивидуализированных слуховых аппаратов. Как и в других медицинских приложениях, процесс проектирования начинается с получения данных пациента по физическому или электронному отпечатку уха, чтобы создать трехмерную производственную модель. В настоящий момент для изготовления слуховых аппаратов используются процессы SLS и SL [7]. Переход на АП-технологии обеспечивает почти полностью автоматизированное решение задачи, сокращая срок поставки аппарата до одного дня и повышая долю подошедших с первой примерки аппаратов до 95% [12].

Авиационно-космическая промышленность

Авиационно-космическая промышленность проявляет острый интерес к АП-технологиям с момента их появления; возможность устранить множество ограничений на пути от проекта к производству позволяет реализовать в проекте решения, повышающие эффективность и снижающие вес деталей. Более того, по самой своей природе этот рынок требует мелкосерийного производства высококачественных деталей, поэтому избавление от инструментальной оснастки, предлагаемое АП-технологиями, приносит существенные выгоды. Однако сертификационные требования, характерные для таких ответственных применений, являются весьма жесткими, поскольку отказ компонентов может с высокой вероятностью повлечь за собой травмы и гибель людей. Тем не менее ряд систем и материалов прошел сертификацию, и сегодня АП-технологии используются для мелкосерийного производства деталей летательных аппаратов. Компания General Electric (GE) заявила о готовности к относительно массовому производству топливных форсунок для своего нового турбовинтового двигателя LEAP с помощью процесса DMLS из кобальтохромового порошка [37, 25]. GE отметила, что может производить по меньшей мере 25 000 форсунок в год (одному двигателю требуется 19 форсунок). Другие занятые в этой отрасли компании, такие как Lockheed Martin, Boeing и Siemens, также пристально изучают возможности АП. Журналисты утверждают, что компания Boeing произвела методами АП более 20 000 деталей, которые уже используются в военных и гражданских самолетах компании [38].

В частности, Boeing установила компоненты, изготовленные из термопластика по процессу SLS, на гражданских самолетах серий 737, 747 и 777 и использовала несколько сотен таких деталей на самолете 787-й серии [39]. В дополнение к этому множество SLS-деталей установлено на нескольких версиях военных самолетов, таких как самолет

дальнего воздушного радиолокационного обнаружения и управления, модели C-40, AWACS и P-8. Еще одним примером может служить трубопровод охлаждения (система контроля состояния среды) на истребителе F/A-18E/F Super Hornet, разработанном компанией Boeing для ВМС США. Технология SLS позволила инженерам объединить различные каналы в единые детали, встроить в них механизмы крепления и сократить общее число компонентов. Это стало возможным благодаря сложной геометрии деталей, реализуемой методами АП. В итоге процесс сборки упростился и сократился во времени, а вес самолета снизился.

Исследования сокращения затрат, вызванного применением АП в аэрокосмической индустрии, указывает на значительный выигрыш при работе над некоторыми деталями или задачами. Например, использование процесса LENS для восстановления турбинных лопаток на военном складе в Аннистоне (США) приводит к экономии \$6297 на каждой детали, что дает годовую экономию \$1 444 416 [23]. Аналогично этому, как показывают расчеты, восстановление торцов лопаток в двигателе AV8B, изготовленных из титанового сплава Ti-6Al-4V, позволяет сэкономить \$715 000 в год [23]. В литературе упоминается множество других сходных сообщений о сокращении расходов на авиационные детали, в том числе прогнозируемая экономия для авиакомпаний в размере \$2,5 млн только за счет снижения на 50–80% веса металлических креплений в салоне при их изготовлении с помощью технологий АП [8].

Автомобилестроение

В силу относительно высокой стоимости и малой производительности технологий АП их применение в автомобилестроении пока связано преимущественно с автоспортом. Высокие объемы производства и требования к качеству массовых транспортных средств привели к тому, что использование АП-технологий сфокусировалось в области изготовления прототипов и инструментальной оснастки, помогая компаниям сократить цикл разработки и производства. Хорошим примером использования АП в автомобилестроении может служить изготовление 100 крышек омывателя фар для Lamborghini Gallardo, выполненное компанией CRP Technologies с помощью SLS-обработки материала с наполнением из углеродных волокон [40]. В этом случае АП-технология позволила сократить сроки для экономически целесообразного изготовления малой партии высококачественных комплектующих.

Компания Daimler AG (Штутгарт, Германия) в партнерстве с Concept Laser и Фраунгоферовским институтом лазерных технологий заменила дорогостоящие и

длительные процессы литья в кокиль и в песчаные формы, применявшиеся для изготовления крупных функциональных металлических частей, АП-процессом, позволившим оптимизировать геометрию деталей и добиться снижения веса [41].

Грядущие перспективы применения АП-технологий в автомобильной промышленности продемонстрировала компания Local Motors, которая с помощью 3D-печати изготовила первый пригодный для поездок автомобиль под названием Strati [42]. Этот двухместный электрокар был впервые официально представлен публике в сентябре 2014 г. в Чикаго. Strati состоит всего из 49 деталей, включая напечатанный на 3D-принтере корпус, в то время как типичный промышленный автомобиль имеет в своем составе несколько тысяч деталей. Печать автомобиля из термопластика, усиленного углеродными волокнами, с помощью лазерной системы заняла примерно 44 часа. Автомобиль способен разогнаться до скорости 40 миль в час и проезжать на одной зарядке до 120 миль. Продажи Strati могут начаться в 2016 г., а его цена составит \$18 000–34 000. Другим пригодным для эксплуатации электромобилем, изготовленным с помощью 3D-печати, станет Urbee 2, который будет производиться с помощью технологии FDM [43].

Производство товаров потребления

Технологии АП нашли также свою нишу в производстве разнообразных товаров массового потребления и предметов домашнего обихода. Расположенная в Нидерландах компания FOC занимается цифровой разработкой предметов обстановки (абжуров, стульев и других декоративных элементов), производя их из нейлонового порошка с помощью технологии LS по мере получения заказов через интернет. Аддитивное производство дает больше свободы дизайнеру, позволяя ему создавать уникальные продукты, отличающиеся от всего, что представлено на рынке. Дополнительная ценность продукта, возникающая благодаря его уникальности, дает возможность производителю назначать более высокую цену. Свобода проектирования распространяется и на клиентов, которые могут через интернет самостоятельно управлять дизайном продукта.

Еще одной иллюстрацией преимуществ, которые дает управление АП через интернет, служит компания Figureprints — сервис 3D-печати персонажей игры World of Warcraft. Клиенты могут создать собственного персонажа с помощью программы на сайте и отправить свой заказ производителю. Фигурка персонажа изготавливается на централизованном производстве в соответствии с заказом и высылается покупателю. В игровой индустрии уже существуют сотни миллионов виртуальных персонажей, которых

покупатели вполне могут захотеть превратить в физические объекты. По этой причине игровую индустрию можно рассматривать как одну из самых привлекательных рыночных ниш для АП-технологий. Сервис Shapeways предлагает пользователям платформу, позволяющую не только создать собственный дизайн продукта, но и предложить его на продажу другим пользователям через интернет-магазин. Такие операции помимо прочего создают сеть взаимоотношений между клиентами и АП-организациями, распределяющую производство в соответствии с необходимыми ресурсами.

2.4.4 Препятствия на пути распространения технологий аддитивного производства

Наиболее часто упоминаются следующие технические и экономические барьеры, препятствующие широкому распространению АП [4, 8, 21, 23]:

- свойства материала (детали часто имеют анизотропные свойства, что обусловлено послойной природой АП-процессов; выбор материалов для АП весьма ограничен);
- точность изготовления и качество поверхности деталей (практически все АП-процессы требуют последующей механообработки в местах сочленений, посадочных мест валов и т.д.);
- скорость изготовления (ограничена мелкосерийным производством);
- высокие капитальные вложения;
- высокая стоимость материалов и обслуживания (АП-процессы требуют специальных форматов материалов, которые могут быть дороже традиционных (листы, профили, и т. п.) в 100–200 раз; оборудование АП все еще несовершенно);
- отличия в геометрии и свойствах между «идентичными» деталями, изготовленными на разных установках;
- закрытая архитектура большинства АП-установок, что не позволяет исследователям и технологам варьировать условия обработки.

Аттестация АП-оборудования является критически важным фактором для внедрения АП и выступает необходимым предварительным условием для сертификации конструктивных узлов. В настоящий момент отмечается неустойчивость характеристик от детали к детали и от установки к установке. Процесс аттестации технологии для того или иного материала может быть различным, однако некоторые обязательные элементы являются общими. Можно выделить три основных вопроса [23]:

- Является ли технология применения данного материала проработанной и стандартизированной? Процесс производства материала должен соответствовать жестко заданной спецификации.

- Имеется ли достаточно полное описание характеристик технологии применения данного материала? Необходимо наличие статистически достоверных данных о механических свойствах материала, соответствующие требованиям MMPDS.
- Были ли проведена демонстрация технологии применения данного материала? Составные части технологии должны быть продемонстрированы в соответствующей рабочей ситуации.

Аттестация АП для применения в конструкционно критических приложениях сталкивается со значительными проблемами по следующим причинам [23]:

- АП — молодая и быстро развивающаяся технология с большим числом достаточно разнородных АП-установок.
- Стандартизация — первый шаг в традиционном процессе аттестации. Однако «замораживание» процесса, необходимое при стандартизации, вступает в прямое содержательное противоречие с АП-обработкой.
- Генерация необходимого объема данных о механических свойствах материалов сопряжена со значительными финансовыми и временными затратами.

К примеру, традиционный подход к аттестации и сертификации деталей летательных аппаратов является весьма затратным как с финансовой точки зрения (необходимо затратить свыше \$130 млн), так и с временной (требуется примерно 15 лет) [23]. Одна лишь наработка статистически значимой базы данных обходится в \$8–15 млн, требует испытания 5 000–100 000 образцов и занимает более 2 лет. Таким образом, требуются альтернативные подходы позволяющие ускоренную аттестацию [23]. В США поиском таких методов занимаются агентство DARPA в рамках Открытой производственной программы (Open Manufacturing Program), и BMC — в рамках проекта DDM ACT. Национальный институт инноваций в области аддитивного производства (NAMI) также принимает заявки на гранты по проведению разработок в этой области.

Для металлических материалов организации проводящие сертификацию, как правило, рассматривают методы АП как процесс «сварки», что сдерживает прогресс этой технологии. В отличие от литейных процессов, где термическая история одинакова по данной детали, в АП-процессе термическая история отличается для разных частей изделия, что порождает остаточные напряжения. Неуверенность в точности и надежности количественного описания теплового распределения в детали влечет за собой неопределенность в остаточных напряжениях и микроструктурных свойствах. На сегодняшний день это приводит к тому, что использование АП-процессов, как правило,

сопровождается чрезвычайно строгими испытаниями для контроля соответствия свойств изделия исходным спецификациям — что сводит на нет все преимущества аддитивного производства.

Производители АП-оборудования обычно привязывают свое оборудование к специфическим процессам управления и патентованным материалам, практически превращая установку, в «черный ящик» и тем самым ограничивая ее применение на рынке. На практике некоторые производители оборудования даже настаивают на том, что они сами должны выполнять программную настройку установки для производства конкретной детали. Такая бизнес-модель ограничивает возможности производителей изделий (пользователей и операторов установки) в том, что касается понимания и развития метрологии АП процессов.

Стандартизация процессов АП, которая ведется в настоящий момент, служит важным шагом в распространении этого производства с использованием металлов. В 2009 г. в Американском обществе по испытанию материалов (ASTM — American Society for Testing and Materials) был сформирован комитет F42, в задачи которого входила разработка международных стандартов в области АП. Спецификация ASTM F2924 для АП путем плавления в емкости порошка титанового сплава Ti-6Al-4V была одобрена в 2012 г. Были созданы и другие важные стандарты, в конечном итоге способствовавшие развитию АП, в том числе ASTM F2792, стандартизовавший терминологию АП (2009 г.), и спецификация формата файла для АП ASTM F915 (2011 г.). Стандарт файловых форматов делает возможной передачу проектов между различными программными и аппаратными системами АП. Он был разработан таким образом, чтобы поддерживать полноцветные процессы с использованием нескольких материалов и возможными градиентами по микроструктуре и материалам.

Широкое распространение АП-технологий предполагает их рентабельность. Факторы, благоприятствующие АП-технологиям в сравнении с традиционным производством, перечислены в таблице 3. При разработке экономического обоснования для использования АП-методов вместо традиционных производственных подходов необходимо принимать во внимание множество факторов. Среди них (1) фиксированные затраты / затраты на однократное производство, (2) стоимость процесса аттестации и сертификации компонентов, (3) расходы на логистику и (4) стоимость затраченного времени.

Таблица 3. Факторы, благоприятствующие аддитивному и традиционному производствам [23]

Благоприятствуют АП	Благоприятствуют традиционному производству
Малые объемы производства	Большие объемы производства
Высокая стоимость материалов	Низкая стоимость материалов
Высокая стоимость станочной обработки	Легкость обработки деталей
	Централизованное производство

АП-технологии в настоящий момент удобны для изготовления малых партий, для которых более высокая стоимость специального сырья компенсируется снижением постоянных затрат, связанных с традиционным производством (рис. 3).

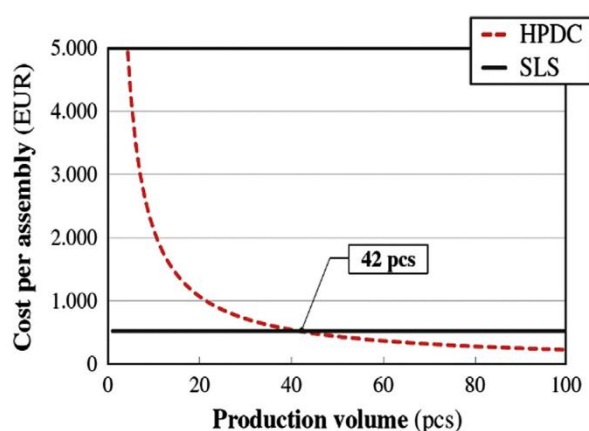


Рис. 3. Анализ рентабельности производства узла самолетного шасси при использовании литья под давлением (HPDC) и процесса SLS [44]

Следует особо отметить такие характеристики АП, как скорость, гибкость и легкость переналадки, поскольку они делают возможным производство «точно в срок». Хотя такой тип экономии труднее измерить, представляется очевидным, что АП является ценной возможностью, когда критическая деталь (нужная, скажем, для того, чтобы система оставалась функциональной) может быть изготовлена за несколько дней вместо нескольких недель. Более того, для крупных организаций, таких как Министерство обороны США, содержание склада запасных частей может требовать высоких затрат и сложным образом зависеть от множества факторов [23]. Технологии АП способны сократить логистическую, снизить расходы и затраты энергии, связанные с упаковкой, транспортировкой и хранением запасных частей. Однако их точное влияние на цепочки поставок остается еще требует дополнительного анализа.

2.4.5 Направления исследований

Сегодня исследования в области АП ведутся преимущественно в специализированных исследовательских центрах, которые создаются в университетах при масштабной поддержке от промышленности и правительства (как федерального так и местного). Все сильнее вовлекаются в эту деятельность национальные исследовательские институты и лаборатории Министерства обороны. Простой поиск в Web of Science по ключевым словам *additive manufacturing* наглядно показывает недавний всплеск исследовательской активности в этой области (рис. 4).

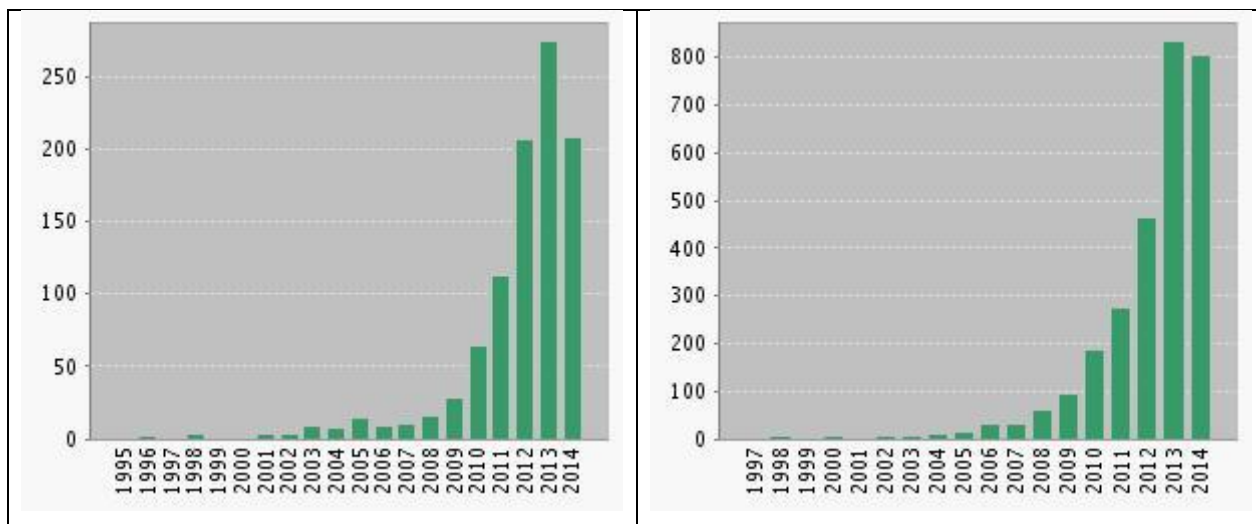


Рис. 4. Слева: количество публикаций с ключевой фразой *additive manufacturing* за последние 20 лет с разбивкой по годам; справа: количество цитирований этих публикаций

«Дорожная карта» развития аддитивного производства, составленная в 2009 г. по итогам семинара с участием 65 ключевых экспертов [4], описывает приоритеты исследований по основным направлениям аддитивного производства. В настоящий момент этот документ является руководством, которое направляет исследовательскую работу в области АП и служит ее обоснованием. Наиболее важные приоритетные направления включают в себя следующие:

Проектирование

- Разработка концептуальных методов проектирования, которые помогут определить границы и провести исследование пространства проектных решений, открываемого АП-технологиями.
- Разработка новых принципов работы для систем автоматизированного проектирования, которые помогут преодолеть ограничения существующих подходов к объемному моделированию в том, что касается представления сложных

геометрических структур и одновременного использования нескольких материалов.

- Разработка многоуровневой методологии процесса моделирования и обратного проектирования, которая поможет ориентироваться в сложной системе соотношений «процесс — структура — свойства».

- Создание методов моделирования и проектирования с вариативностью параметров: форма, процесс, свойства.

Моделирование и управление процессом

- Разработка предсказательных моделей для связей «процесс — структура — свойства», интегрированных в системы автоматизированного проектирования, конструирования и производства (CAD/E/M).

- Создание адаптивной и саморегулирующейся системы управления с возможностями прямой и обратной связи. Алгоритмы системы управления должны опираться на предсказательную модель реакции системы на изменения в процессе.

- Создание новых датчиков (sensors), способных функционировать в рабочих камерах установок АП, и разработка методов обработки информации, полученной от набора различных датчиков (sensor fusion).

Процессы в материалах и установки

- Достижение более полного понимания физики АП-технологий, которое учитывает сложное взаимодействие различных физических явлений.

- Разработка масштабируемых и скоростных методов линейной и поверхностной обработки материалов для увеличения производительности оборудования.

- Создание для АП-установок контроллеров с открытой архитектурой и переналаживаемых модулей.

- Реализация уникальных особенностей АП в производстве эпитаксиальных металлических структур, выпуске деталей состоящих из нескольких материалов и градиентных материалов .

- Разработка методологии определения того, почему некоторые материалы могут быть обработаны методами АП, а некоторые — нет.

- Разработка инструментов для поэтапного аддитивного производства структур и устройств и для проектирования нанопроизводства.

- Разработка экологических («зеленых») материалов, в том числе биоразлагаемых, подлежащих вторичной переработке и повторному использованию.

Существующие промышленные системы автоматизированного проектирования (CAD) плохо подходят для моделирования деталей сложной конструкции (напр., решеток или ячеек), содержащих тысячи различных форм и/или состоящих из градиентных материалов [4]. В этих случаях, из-за особенностей используемых технологий параметризации, САПР, как правило, работают медленно, занимая сотни мегабайтов или даже гигабайты оперативной памяти. Это существенно ограничивает применение существующих САПР для моделирования композитных, градиентных и биологических материалов; поэтому, необходима разработка САПР с прицелом на решение таких проблем. Более того, для оптимального применения в задачах АП системы автоматизированного проектирования должны уметь преобразовывать требования к механическим свойствам изделия в особенности геометрии и/или распределения материалов — задача, требующая интеграции соотношений «процесс — структура — свойства» в системы автоматизированного проектирования, конструирования и производства (CAD/CAE/CAM). Это, в свою очередь, требует разработки соответствующих вычислительных методов для многоуровневого моделирования, обратного проектирования и оптимизации. Еще одним направлением развития является интеграция методов автоматизированного контроля в CAD/CAE/CAM-системы, что может помочь в вопросах анализа изделий *in situ* непосредственно в ходе изготовления, при условии, что в рабочую область АП-установки можно установить соответствующие датчики. Количественное сопоставление номинальных проектных характеристик (геометрии и состава материала) изделия с реальными непосредственно в процессе изготовления может открыть дополнительные возможности для создания управляющей обратной связи.

Для планирования процесса и анализа изделия необходимы высокоточные модели. Серьезные проблемы в разработке таких моделей связаны с присущей АП-процессам изменчивостью условий, затрудняющей управление процессом. Одним из подходов к решению этой проблемы является оснащение АП-установки различными датчиками и интеллектуальными системами управления [4]. Это создает потребность в разработке методов упреждающего управления, которые позволят предвидеть возникновение в процессе изготовления проблем, связанных с геометрией изделия, паттернами сканирования и другими зависящими от конкретного изделия условиями. Методы

управления с обратной связью нужны, чтобы скомпенсировать отклонения в условиях процесса, учесть различия локального состава материалов и справиться с другими проблемами обработки, которые сложно предсказать заранее. Модели и карты процесса должны иметь вычислительную реализацию, чтобы облегчить симуляцию и анализ процесса. Необходимы также удобные для пользователя инструменты моделирования, позволяющие планирование процесса и испытания новых датчиков и методов управления.

Для эффективного управления процессом требуются новые технологии датчиков, чтобы отслеживать точность формы изделия, качество поверхности и возникновение макроскопических дефектов (напр., пор или трещин), а также параметры самого процесса (распределение температуры, размер бассейна расплава, разброс капель струи и т. п.). Эти датчики должны быть приспособлены для работы в условиях типичных для АП-процессов, — например, осуществлять проверку габаритов в емкости с порошком, качества поверхности в жидком полимере или в поддерживающих структурах. Разработка устройства датчиков должна сопровождаться разработкой методов интерпретации их показаний и интеграции данных. Большие массивы данных, порождаемые датчиками, должны сводиться к форматам, пригодным для подачи на вход систем управления установкой. Наконец, пользу могут принести технологии машинного обучения, которые позволят АП-установкам совершенствовать свою производительность с течением времени. Пока не ясно, подходят ли существующие инструменты машинного обучения для уровня сложности задач, присущих технологиям АП.

Одно из самых значительных направлений исследования обусловлено необходимостью достичь более полного и фундаментального понимания физических основ каждого процесса АП. В частности, одной из ключевых задач является более глубокое понимание деталей взаимодействия различных источников энергии с материалами. Примерами насущных задач такого рода может служить понимание того, как количество и распределение потребляемой энергии сказывается на микроструктуре и свойствах изделия. Чтобы выбрать оптимальное значение плотности энергии лазера, необходимо точно знать коэффициенты поглощения материалов; в целом энергия лазера должна быть тем меньше, чем выше коэффициент поглощения. Показатели поглощения порошков, используемых в процессах АП, отличаются от показателей для аналогичных монолитных материалов, а также зависят от характеристик процесса. Изучение механизмов поглощения энергии лазерного излучения порошками остается важным направлением исследований [19].

Необходимо обратить более пристальное внимание на системы АП смешанного типа [4]. Такие системы могут открыть новые возможности обработки, в том числе использование множественных аддитивных процессов, совмещение послойных технологий с другими, совмещение аддитивного и вычитающего производства, интеграцию элементов изделия при помощи автоматизированной вставки компонентов. Примером смешанной системы такого рода может служить набор аддитивных технологий, способный создавать конструкционные 3D-материалы с электронными компонентами, размещенными путем внедрения и прямой записи, что вкупе с автоматизированным внедрением предварительно произведенных компонентов позволяет изготовить полностью интегрированное электромеханическое изделие как целостную систему.

Материалы — неотъемлемая составная часть технологий АП. Сегодня эти технологии способны обрабатывать широкий круг однородных и неоднородных материалов. Ключевой задачей в области создания и обработки материалов является улучшение качества, повышение стабильности процесса, воспроизводимости и надежности для разнообразных материалов при сохранении низкой стоимости материала, установки, процесса изготовления и чистовой обработки. Традиционное производство в целом надежно обеспечивает воспроизводимость структуры и свойств материалов. Процессы АП являются более сложными, поскольку для получения приемлемого качества изделия параметры установки должны быть заданы индивидуально, и в ряде случаев структура материала, свойства и производительность не только отличаются от установки к установке, но зависят даже от расположения внутри одной установки.

Уникальный метод обработки в АП предъявляет особые требования к металлическим и керамическим порошкам. Например, важным условием использования порошка в АП-технологиях является его текучесть, поскольку в основе обработки лежит распределение порошка по поверхности (процессы LS/LM) или подача порошка (процессы LMD, DMD) [19]. Чтобы удовлетворить требованиям АП-приложений, необходимо дальнейшее изучение химических и физических свойств, методов подготовки и способов описания характеристик порошковых материалов. Расширение спектра материалов, пригодных для аддитивного производства, потребует исследования многоэлементных систем и форм, в том числе легированных/смешанных/композитных порошков на основе железа, никеля, титана, алюминий, меди и магния.

На текущий момент есть весьма ограниченное количество промышленных сплавов, пригодных для использования в АП-технологиях. Наиболее интенсивно был изучен сплав титана, алюминия и ванадия Ti-6Al-4V, обладающий уникальными химическими и

механическими свойствами, а также хорошо задокументированной биосовместимостью [23]; этот сплав нашел широкое применение в авиационно-космической промышленности и медицине. В АП-процессе каждый отдельный слой металла наносится поверх предыдущего, создавая сложный и изменяющийся с течением времени температурный профиль внутри детали. В итоге сплав может многократно переходить из твердой фазы в жидкую и обратно. В целом процессы затвердевания протекают в процессах АП относительно быстро — скорость остывания для процессов типа SLM имеет порядок 10^4 К/с. Тепловой поток в АП-процессах имеет выраженную направленность и часто приводит к образованию колончатой (columnar) микроструктуры. Микроструктура итогового материала определяется совместным влиянием быстрого затвердевания, направленного охлаждения и фазовых переходов, вызванных повторяющимися термическими циклами. Быстрое затвердевание затрудняет сегрегацию химических элементов и повышает растворимость в твердой составляющей, что может привести к образованию метастабильных фаз. Направленный отбор тепла может задать предпочтительное направление роста зерен и кристаллографическую текстуру. Все эти факторы создают сложности, которые обычно отсутствуют в традиционных процессах. Для широкого круга материалов, применимых в АП, необходимо выполнить масштабные исследования для установления соотношений «процесс — структура — свойства». Когда будет накоплен достаточный объем информации, появится возможность сформировать базу данных физико-химических процессов происходящих в материалах, которая поможет упростить АП широкого круга материалов, сделать его более точным и надежным.

При надлежащей технологии АП-процесса металлические материалы демонстрируют статические механические свойства, сопоставимые со свойствами аналогичных материалов, полученных при использовании традиционных технологий [19, 23]. АП-материалы имеют преимущества благодаря менее выраженной химической сегрегации и мелкозернистости, которые достигаются быстрым охлаждением. Однако характерная для АП-материалов анизотропия микроструктуры влечет за собой соответствующую анизотропию механических свойств — направление, перпендикулярное слоям, оказывается наиболее слабым. Динамические свойства АП-сплавов (напр., усталость), изученные значительно меньше статических, обычно определяются наличием таких дефектов как микропоры, которые часто связывают с захватом газов и качеством поверхности. Влияние качества поверхности на динамические свойства остается предметом споров. В некоторых исследованиях утверждается, что оно критически важно для повышения сопротивления усталости [23], тогда как в других работах делается вывод

о его незначительной роли в рамках динамического диапазона жизненного цикла изделия [19]. Для полного решения этого вопроса необходимы систематические исследования, охватывающие более широкий круг АП-материалов.

Вплоть до текущего момента основная деятельность в области АП была сосредоточена на изделиях из пластиков и металлов. Однако технология АП привлекательна и для изготовления керамических деталей. Широкое промышленное использование высококачественных керамических материалов тесно связано с доступностью технологий получения формы изделий, близкой к заданной, поскольку механообработка керамики является времязатратным и дорогим процессом, требующим, как правило, использования алмазных инструментов. Во многих случаях на станочную обработку приходится до 80% всех производственных затрат [45], что может послужить хорошим стимулом для изготовления керамических деталей методами АП. 3D-печать с прямым нанесением мелкодисперсных керамических (двуокись циркония, двуокись титана, титанат бария, цирконат-титанат свинца) суспензий через инжекционное сопло с успехом применялась в исследовательских лабораториях для изготовления как миниатюрных деталей сложной формы, так и структурированных тонкопленочных покрытий (без использования масок и травления) [45]. В промышленных масштабах АП-процесс с успехом применяется при изготовлении форм для песчаного литья в добывающей и нефтегазовой промышленности. При этом используются технологии струйной порошковой печати, такие как процесс, реализованный в АП-системе ExOne [46]. В этом случае при отказе детали можно быстро напечатать форму на 3D-принтере, передать ее в литейный цех для изготовления отливки, оперативно получить деталь и установить на место. Успех такого производства «точно в срок», реализованного благодаря АП-технологиям, обусловлен высокими финансовыми потерями от простоя скважины. Важное направление исследований представляет собой распространение АП-технологий на точное литье, которое требует воспроизведения более тонких деталей и лучшего качества форм и стержней чем литье в песчаные формы.

В том, что касается изделий из плотной керамики, процессы роботизированного литья (robocasting) и LOM (таблица 1) в настоящий момент являются, пожалуй, наиболее успешными вариантами аддитивного производства керамических деталей в масштабируемых количествах. Роботизированное литье представляет собой экструзию керамической массы через формирующее отверстие в закрепленной головке на подвижный стол либо из подвижного манипулятора на стационарную подложку. Реологические свойства керамической массы могут регулироваться так, чтобы наносимый материал был

способен удерживать собственный вес вплоть до высушивания и обжига. Роботизированное литье эффективно при производстве, например, керамических фильтров, используемых при обработке металлических расплавов [46]; технологии АП позволяют сконструировать отверстия специальной формы, улучшающие характеристики фильтра. В процессе LOM керамические листы, полученные пленочным литьем, точно нарезаются по заданной форме и накладываются друг на друга. Этот метод является перспективным для изготовления функционально-градиентных керамических изделий и изделий с высокой плотностью [46]. Например, компания Ceralink, Inc (США) в настоящий момент комбинирует биомимикрический подход к проектированию с процессом LOM, использующим металлы и керамику. Другим перспективным применением процесса LOM для изготовления керамических деталей является микроструйная техника. Возможность применения обеих технологий для производства изделий из плотной керамики представляет собой область активных исследований.

Технологии АП вызывают также деятельный интерес с точки зрения изготовления изделий из композитных материалов. В рамках оборонных исследований было предпринято изучение применимости АП-технологий для производства материалов с многоуровневой иерархической функциональностью на нано- и микро-шкалах. Например, ученые и инженеры из Лаборатории военных исследований США совместно с Университетом Висконсин — Мэдисон разработали технологию создания трехмерного полимерного композитного материала с помощью АП-процесса в электрическом поле [47]. В этом методе, названном ламинарным синтезом композитного материала под полем (FALCom — Field-Aided Laminar Composite processing), частицы в полимере выравниваются и ориентируются в желаемом направлении с помощью электрических полей *in situ* в любой точке в ходе аддитивного производства трехмерной детали. Еще одна важная область исследований связана с применением технологий АП для изготовления металллокерамических композитных материалов с металлической матрицей (MMC — metal-matrix composite). Среди примеров следует назвать вольфрам-карбидный композит (Co-WC MMC), обработка которого выполнялась как по процессу LS, так и по процессу LMD [19]. В настоящее время плотность MMC, изготовленных с помощью АП-технологий, страдает из-за захвата газов, агломерации частиц и микротрещин, развивающихся по границам между включениями и матрицей. Решение этих проблем требует дальнейшей исследовательской работы. Применение процессов АП для производства изделий из композитных материалов с керамической матрицей (CMC — ceramic-matrix composite) также является областью активных исследований [46]. Так

несколько групп изучают возможности изготовления деталей из интерметаллических/керамических композитов с получением формы изделия, близкой к заданной, с помощью инфильтрации материала в пористую структуру заготовок, изготовленных путем 3D-печати [46].

В то время как основные усилия сосредоточены на разработке процессов и материалов, исследовательская работа в области внедрения АП остается весьма ограниченной. Многие опубликованные работы опираются на смоделированные, а не реальные примеры. Нормативная база по внедрению АП, которой могли бы пользоваться лица, отвечающие за принятие решений во внедряющих организациях, по-прежнему нуждается в проработке. Недостаточно исследованы также социально-организационные аспекты развертывания этой технологии. Все перечисленные области требуют исследовательских усилий для того, чтобы обеспечить широкое распространение технологий АП.

Современное образование в области проектирования не отвечает требованиям, предъявляемым АП-технологиями. Нынешние проектировщики могут пройти переобучение, однако в рамках технического обучения и подготовки по программам колледжей и университетов необходимо приложить значительные усилия к тому, чтобы следующее поколение инженеров и исследователей было обучено применению технологий аддитивного производства. Для подготовки следующего поколения кадров в области АП требуется разработать технические курсы высокого уровня. В рамках этих курсов следует уделить особое внимание научным основам АП-технологий и обучить инженеров разработке более совершенных методов анализа, схем управления и программных инструментов для АП.

2.4.6 Аддитивное производство в России: текущее состояние и перспективы

В России использованием и внедрением технологий аддитивного производства занимается ограниченное количество промышленных компаний и исследовательских центров, наиболее значимые из которых перечислены в таблице 4. Диапазон деятельности этих компаний и центров относительно узок. Они преимущественно выступают в качестве посредников, продающих АП-оборудование, и/или занимаются быстрым прототипированием, которое для современного АП представляет собой вчерашний день. Очень малое количество компаний располагает мощностями для производства функциональных комплектующих из материалов с хорошими эксплуатационными характеристиками, и уж тем более мало кто способен производить эти детали в промышленных количествах. Такая ситуация предположительно вызвана высоким

уровнем капитальных затрат, связанных с АП-оборудованием высокого класса, которое к тому же требует наличия соответствующим образом обученного и подготовленного персонала. Другой серьезный фактор связан с тем, что полноценное использование преимуществ АП, которые оправдали бы его применение в промышленном производстве, предполагает высокий уровень управления всем жизненным циклом продукции — нечто, что в российской промышленности практически отсутствует.

Отсутствию значимой коммерческой заинтересованности в АП-технологиях, выходящих за рамки быстрого прототипирования, сопутствует весьма ограниченный объем исследовательской деятельности в этой области. Показательно, что количество российских публикаций по вопросам АП составляет всего 0,76% от общемирового. По количеству публикаций Россия занимает 26-е место в мире, разделяя его с Грецией, Израилем, Финляндией и Польшей. С российскими техническими публикациями, занесенными в список Web of Science, связана 21 исследовательская организация, куда входят по большей части научно-исследовательские институты ныне не существующей Российской Академии Наук и несколько университетов из Санкт-Петербурга и Москвы. За последние 15 лет в России был выдан 131 патент по различным аспектам АП (0,14% от мирового количества), причем 14 из них получены российскими заявителями, а 117 — иностранными. Для сравнения, Южная Корея, США, Япония и Китай совместно владеют 90% патентов в этой сфере.

Отставание России от стран, лидирующих в области АП, и без того колоссальное, продолжает быстро нарастать, особенно если принять во внимание скоординированные усилия правительств, промышленности и академических институтов стран-лидеров, направленные на широкое распространение аддитивного производства в промышленности. В число ключевых факторов, которым необходимо уделить особое внимание, чтобы расширить применение АП-технологий в российской промышленности, входит наличие (1) инфраструктуры для АП (например, инструментов управления жизненным циклом продукции, стандартов и т. п.), (2) квалифицированной рабочей силы, (3) доступного АП-оборудования высокого класса и (4) материалов для АП, разработка которых сама по себе является сложной междисциплинарной задачей. К числу дополнительных, но столь же важных факторов относится ознакомление профессионалов и менеджеров из различных отраслей промышленности с преимуществами применения технологий АП. Помимо этого, промышленное внедрение этих технологий будет невозможным без значительных инвестиций в фундаментальные и прикладные исследования. Опыт других стран показывает, что все эти задачи не могут быть решены

без существенного участия правительства и продуманных финансовых стимулов, которых в России сейчас остро недостает.

Что касается индустрии АП как таковой, то разработка в России нового АП-оборудования промышленного уровня на текущий момент может оказаться нецелесообразной, если только его стоимость (при сравнимом качестве) не окажется значительно ниже стоимости оборудования существующих поставщиков или же новое оборудование не будет обладать принципиально новыми возможностями делающими его привлекательным для российского рынка. В то же время разработка программных инструментов и создание АП-материалов, в том числе подходящих металлических порошков, могут стать многообещающими направлениями, по крайней мере для внутреннего рынка, и в этом качестве заслуживают пристального внимания. Однако, подобная деловая активность, тесно связанная с созданием инфраструктуры для аддитивного производства, вряд ли способна стать прибыльной сама по себе, без включения в общенациональную программу вывода аддитивного производства на широкий, хотя бы и внутренний, рынок.

Таблица 4. Российские компании и исследовательские центры, работающие в области АП

Компания/исследовательский центр	Расположение	Основные темы и сферы деятельности
Центр быстрого прототипирования и изготовления малых серий при институте НАМИ	Москва	Быстрое прототипирование с использованием процессов SLS и SLA и различных полимеров; не работает с металлами и керамикой; недостаточно мощностей для станочной обработки
ООО «Инженерная фирма АБ Универсал»	Москва	Демонстрация и продажа оборудования АП; нехватка мощностей для станочной и чистовой обработки
Центр прототипирования и дизайна МГТУ МАМИ	Москва	Обучение АП, изготовление образцов деталей для целей обучения
Компания Cybercom, Ltd.	Москва	Демонстрация и продажа оборудования; ограничивается использованием полимеров, не работает с металлами и керамикой
ООО «Три Д Формат»	Москва	Демонстрация и продажа оборудования
Компания «Солвер» (Проектный центр)	Воронеж	Демонстрация и продажа оборудования; обучение АП

ОАО «НИАТ» < НТК «Цифровые Технологии» ОАО НИАТ	Москва	Технологическое развитие авиационно-космической промышленности; НИОКР; производство функциональных комплектующих и прототипов для авиационно-космической промышленности
Лаборатория инновационных аддитивных технологий (ЛИАТ) МГТУ «Станкин»	Москва	Обучение студентов и инженеров, участие в НИОКР, производство изготовление образцов деталей
Фирма NISSA Printcad	Москва	Демонстрация и продажа оборудования
Центр прототипирования ООО «Завод по переработке пластмасс имени Комсомольской Правды»	Санкт-Петербург	Производство деталей из пластиков/термопластиков
Научно-исследовательский институт машиностроительных технологий	Санкт-Петербург	Обучение студентов и инженеров, НИОКР, изготовление образцов деталей для целей обучения
Межкафедральная лаборатория аддитивных технологий	Самара	Обучение студентов и инженеров, производство функциональных комплектующих и изготовление прототипов из полимеров
ООО Научно-технический центр "Cybercad"	Ставрополь	Демонстрация оборудования; производство функциональных комплектующих и изготовление прототипов
Компания «Артик»	Казань	Изготовление моделей и прототипов, промышленный дизайн
Центр FDM-прототипирования	Москва	Демонстрация технологии FDM; производство функциональных комплектующих и изготовление прототипов
Группа компаний C-Soft	Воронеж	Продажи оборудования 3D Systems

Сокращения

AM – additive manufacturing	аддитивное производство
ASTM – American Society for Testing and Materials	Американское общество по испытанию материалов
DMLS – directed metal laser sintering	прямое лазерное спекание материалов

DMD – direct metal deposition	прямое нанесение металлов
FDM – fused deposition modeling	изготовление объектов путем послойной наплавки
EBM – electron beam melting	электронно-лучевая плавка
EFF – extrusion freeforming	произвольное экструзионное формование
IJP – ink-jet printing	струйная печать
LENS – laser engineered net shaping	точное лазерное формование
LOM – laminated object modeling	послойное изготовление объектов из листового материала
SL – stereolithography	стереолитография
SLS – selective laser sintering	селективное лазерное спекание
SLM – selective laser melting	селективная лазерная плавка
3DP – 3-D printing	3D-печать

2.4.7 Список литературы

1. ASTM Standard, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, vol. 10.04
2. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO₂ Emissions, Powder Metall Rev., (2013) <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>
3. J. Holmstrom, J. Partanen, H. Tuomi, and M. Walter, “Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment,” Journal of Manufacturing Technology Management, 21 [6], 687-697 (2010)
4. D. L. Bourell, J. J. Beaman, Jr., M. C. Leu, and D. W. Rosen, A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, U. S. Turkey Workshop on Rapid Technologies, (2009)
5. Additive Manufacturing: Opportunities and Constraints, A report of Roundtable Hosted by the Royal Academy of Engineering, (2013), <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing>
6. Hype Cycle for Emerging Technologies, (2012) <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315>
7. N. Hopkinson, R. Hague, and P. Dickens, Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey, (2006)
8. “Wohlers Report 2013”, Wohlers Associates, (2013)
9. Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business, and the Global Economy, McKinsey Global Institute, (2013), http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies
10. A. Y. C. Nee, J. Y. H. Fuh, and T. Miyazawa, On the Improvement of the Stereolithography (SL) Process, J. Mater. Process. Techn., 113 [1-3], 262-268 (2001)
11. S. A. Skoog, P. L. Goering, R. J. Narayan, Stereolithography in Tissue Engineering, J. Mater. Sci: Mater Med., 25, 845-856 (2014)
12. V. Petrovic, J. Vicente, H. Gonzalez, O. J. Fernando, J. D. Gordillo, J. R. B. Puchades, and I. P. Grinan, Additive Layered Manufacturing: Sectors of Industrial Application Shown Through Case Studies, Int. J. Production Res., 49 [4], 1061-1079 (2011)

13. A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modeling Processed Parts, *Materials & Design*, 31 [1], 287-295 (2010)
14. J. Wang and I. L. Shaw, Rheological and Extrusion Behavior of Dental Porcelain Slurries for Rapid Prototyping Applications, *Mater. Sci & Eng., A*, 397 [1-2], 314-321 (2005)
15. R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan, Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modeling, *J. Mater. Proc. Tech.*, 118 [1-3] 385-388 (2001)
16. K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, and N. Venkata Reddy, Optimum Part Deposition Orientation in Fused Deposition Modeling, *J. Machine Tools and Manufacture*, 44 [6], 585-594 (2004)
17. K. Senthilkumaran, P. M. Pandey, and P. V. M. Rao, Influence of Building Strategies on the Accuracy of Parts in Selective Laser Sintering, *Materials & Design*, 30 [8], 2946-2954 (2009)
18. J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. H. C. Childs, Consolidation Phenomena in Laser and Powder-bed Based Layered Manufacturing, *Annals CIRP*, 56, 730-759 (2007)
19. D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes, and Mechanisms, *Inter. Mater. Rev.*, 57 [3], 137-164 (2012)
20. O. L. A. Harrysson, O. Cansizoglu, D. J. Marcellin-Little, D. R. Cormier, and H. A. West II, Direct Metal Fabrication of Titanium Implants with Tailored Materials and Mechanical Properties Using Electron Beam Melting Technology, *Mater. Sci & Eng., C*, 28 [3], 366-373 (2008)
21. S. Collins, Laser and Electron Beam Powder Bed Fusion, in *Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing*, NIST (2013), http://www.nist.gov/el/isd/upload/NISTAdd_Mfg_Report_FINAL-2.pdf
22. B. Mueller and D. Kochan, Laminated Object Manufacturing for Rapid Tooling and Patternmaking in Foundry Industry, *Computers in Industry*, 39 [1], 47-53 (1999)
23. W. E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *J. Mater. Eng. Performance*, 23 [6], 1917-1928 (2014)
24. ATKINS Project: A Low Carbon Manufacturing Solution, Loughborough University Project No: N 0012J (2007) <http://www.atkins-project.com/>
25. W. R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, and S. J. Skerlos, Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing, *J. Clean Prod.*, 15, 932-943 (2007)
26. Y. Luo, Z. Ji, M.C. Leu, R. Caudill, Environmental Performance Analysis of Solid Freeform Fabrication Processes, *IEEE 0-7803-5495-8/99* (1999)
27. K. Kellens, E. Yasa, W. Dewulf, J. P. Kruth, J. R. Duflou, Energy and Resource Efficiency of SLS/SLM Processes, *Proceedings of Twenty-Second International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2011
28. R. Bibb and J. Winder, A Review of the Issues Surrounding Three-Dimensional Computed Tomography For Medical Modeling Using Rapid Prototyping Techniques, *Radiography*, 16 [1], 78-83 (2010)

29. R. Sodian, M. Loebe, A. Hein, D. P. martin, S. P. Hoerstrup, E. V. Potapov, H. Hausmann, T. Leith, R. Hetzer, Application of Stereolithography for Scaffold Fabrication for Tissue Engineered Heart Valves, SAAIO J., 48 [1], 12-18 (2002)
30. R. Sodian, P. Fu, C. Lueders, D. Szymanski, C. Fritsche, M. Gutberlet, S. P. Hoerstrup, H. Hausman, T. Lueth, R. Hetzer, Tissue Engineering of Vascular Conduits: Fabrication of Custom-Made Scaffolds Using Rapid Prototyping Techniques, Thorac Cardiovasc. Surg., 53 [3], 144-153 (2005)
31. S. Singare, L. Dichen, L. Bingheng, L. Yanpu, G. Zhenyu, L. Yaxiong, Design and Fabrication of Custom Mandible Titanium Tray Based on Rapid Prototyping, Med. Eng, Phys., 26, 671-677 (2004)
32. J. He, D. Li, B. Lu, Z. Wang, T. Zhang, Custom Fabrication of a Composite Hemi-Knee Joint Based on Rapid Prototyping, Rapid Prototyp. J., 12 [4], 198-205 (2006)
33. G. Wurn, B. Tomancok, K. Holl, J. Trenkler, Prospective Study on Cranioplasty with Individual Carbon Fiber Reinforced Polymere (CFRP) Implants Produced by Means of Stereolithography, Surg. Neurol., 62, 510-531 (2004)
34. P. S. D'Urso, W. J. Earwaker, T. M. Barker, M. J. Redmond, R. G. Thompson, D. J. Effeney, and F. H. Tomlinson, Custom Cranioplasty Using Stereolithography and Acrylic, British J. Plastic Surgery, 53 [3], 200-204 (2000)
35. Parts Without Limits: Additive Manufacturing, (mini feature), Assem. Automat., 31 [3] (2011)
36. B. Vandenbroucke and J.-P. Kruth, Selective Laser Melting of Biocompatible Metals for Rapid Manufacturing of Medical Parts, Rapid Prototyp. J., 13 [4], 196-203 (2007)
37. P. Wray, Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out, Amer. Ceram. Soc. Bull., 93 [3], 17-23 (2014)
38. D. H. Freedman, Layer by Layer, MIT Tech. Rev., 115 [1], 50-53 (2012)
39. R. Ehrenberg, The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time, Science News, 183 [5], 20-25 (2013)
40. Lamborghini Gallardo Headlight Washer Cover Flap, CRP Group, <http://www.crp.eu/PDF/cs-gallardo-headlight-washer-cover-flap.pdf>
41. Y. Zhai, D. A. Lados, J. L. Lagoy, Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation, JOM, 66 [5], 808-816 (2014)
42. World's First 3-D Printed Car, <https://localmotors.com/localmotors/the-3d-printed-car-aka-direct-digital-manufacturing/>
43. <http://korecologic.com/>
44. E. Atzeni and A. Salmi, Economics of Additive Manufacturing For End-Usable Metal Parts, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 62 [9], 1147-1155 (2012)
45. N. Travitzky, A. Bonet, B. Dermeik, T. Fey, I. Filbert-Demut, L. Schlier, T. Schlördt, P. Greil, Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials, Adv. Eng. Mater., 16 [6], 729-753 (2014)
46. P. Wray, Industry Embraces Ceramic Additive Manufacturing – Layer by Layer, Amer. Ceram. Soc. Bull., 93 [3], 24-27 (2014)
47. L. R. Holmes JR and J. C. Riddick, Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure, JOM, 66 [2], 270-274 (2014)

2.5 Новые материалы

2.5.1. Спроектированные материалы и производство

I. Введение

В этом разделе мы описываем роль спроектированных материалов в производстве. Термин «спроектированные материалы» отражает тот факт, что мы рассматриваем широкий спектр искусственных материалов, спроектированных и изготовленных с целью отвечать набору функциональных требований, выходящих за рамки механической способности нести/содержать физические объекты или нести нагрузку. Спроектированные материалы могут быть или монолитными, или представлять собой сплавы нескольких металлов, или композиционными материалами на основе металлических, полимерных и керамических материалов различных форм, таких как построенные на основе частиц или волокон армирования.

Спроектированные материалы обладают двумя важными ролями в стимулировании инноваций в производстве. Первая из этих ролей относится к их собственному производству как инженерных материалов, используемых при изготовлении деталей, узлов и агрегатов с использованием традиционных методов производства. Вторая роль предполагает разработку новых методов производства деталей, узлов и агрегатов на основе этих материалов с уникальными свойствами, что обеспечивает гибкость и мотивацию для инновационных разработок новых технологий производства. Различие между указанными ролями не всегда может быть четко прослежено, поскольку производство материалов является неотъемлемой составляющей производства деталей и/или узлов. Другими словами, сами материалы изготавливаются во время производства детали, интегрируя тем самым производство материала и детали в единое целое. Понятие об интегрированном производстве может быть продолжено и на узлы и агрегаты, рассматриваемые как сборку деталей, интегрируя тем самым производство материалов, деталей, узлов и агрегатов.

Дизайн и производство спроектированных материалов может рассматриваться с точки зрения масштаба, на котором основные компоненты материала соединяются для формирования спроектированного материала. Этот масштаб может быть атомарным, молекулярным, микромеханическим, макромеханическим или отвечать характерному

размеру конструкции, измеряемому в метрах. В приведенных ниже разделах обсуждается влияние масштаба, когда необходимо проводить различие между технологиями производства материала и/или узла/агрегата.

Следующий раздел отчета проводит исторический обзор дизайна спроектированных материалов и конструкций, предваряющего этап производства, поскольку дизайн материала или детали/агрегата оказывает влияние на производство. Обратное также верно, поскольку при дизайне необходимы данные о возможностях производства. Другими словами, существует неразрывная связь между дизайном и производством, и необходим интегрированный подход, при котором дизайн и производство рассматриваются одновременно.

II. Дизайн спроектированных материалов и конструкций

Исторически традиционные полимерные композиционные материалы с волоконным армированием, таким как углеродное волокно или стекловолокно, были первыми материалами, рассматриваемыми как замена монолитных материалов, в которых отдельные компоненты состояли из единственного материала (неармированный полимер) или комбинация материалов, когда индивидуальные компоненты неразличимы (металлический сплав). Высокая удельная жесткость (на единицу веса) и высокая удельная прочность этих композиционных материалов по сравнению со всеми сплавами алюминия были главной причиной их использования, когда вес конструкции являлся критическим параметром, как в ракетно-космических и авиационных конструкциях. И хотя уникальные технологии их производства, обсуждаемые ниже, позволяли варьировать форму и структуру, первоначальные подходы были строго консервативными, когда конструкции, изготовленные из композиционных материалов, выглядели подобно их металлическим аналогам, за исключением только черного цвета в отличие от блеска, присущего металлам.

Использование армированных композиционных материалов имеет важное отличие при дизайне деталей и конструкций. Из-за высокой жесткости и прочности армирующих волокон, а также отсутствие в сравнении существенных жесткости и прочности полимерной матрицы, связывающей волокна, композиционные материалы обладают сильно выраженной анизотропией. Кроме того, отношение свойств материала в двух взаимно перпендикулярных направлениях может регулироваться или проектироваться при использовании различных типов армирования. Даже если используется тот же тип

волокон, требуемые свойства могут моделироваться варьированием отношения доли армирования и связующего. Тем самым, впервые в истории изготовления инженерных изделий у дизайнеров появилась возможность проектировать свойства материалов, которые потом используются при дизайне размеров и геометрии деталей. Эта возможность была обусловлена, конечно, тем, что композиционная структура материала может быть изготовлена как отвечающая заданным требованиям. В следующем разделе кратко обсуждаются возможности изготовления материалов, основанные на микромеханической комбинации компонент, составляющие микромеханический дизайн.

Следующий уровень возможностей дизайна возник из уникальной технологии производства при создании композитных деталей и конструкций. Поскольку свойства композиционного материала, армированного волокнами, низкие в направлении, перпендикулярном волокнам, решением являлось создание слоистого пакета из многочисленных однонаправленных слоев с укладкой, способной обеспечить требуемые свойства по заданным направлениям и компенсирующей низкие свойства однонаправленного материала в поперечном направлении. Создание много-направленных слоистых пакетов расширило возможности проектирования материалов, что обычно называют макромеханическим дизайном свойств материала, что также кратко обсуждается в следующем разделе.

Главный прорыв в нашем понимании взаимосвязи между производством композиционных материалов и характеристиками конструкции произошел, когда инженеры создали новые конструкционные конфигурации, которые они могут спроектировать на основе уникальных технологий изготовления, используемых в производстве. Этот вопрос обсуждается в последнем разделе этой главы, посвященной производству спроектированных материалов и конструкций.

Перед тем как перейти к производству, мы рассматриваем тему дизайна материалов, рассматривая другие формы проектирования материалов, ставшие ведущими направлениями исследований в отношении как дизайна, так и производства спроектированных материалов.

III. Дизайн материала на разных масштабах

Вскоре произошло осознание того, что проектирование материала на основе макромеханики и микромеханики может быть выполнено на более малых масштабах.

Данный раздел детально рассматривает вопрос проектирования материалов, предваряя вопросы производства инновационных систем материалов.

III-1 Атомный/кристаллический уровень дизайна:

На самом малом масштабе дизайн материала может быть выполнен с помощью численного предсказания и моделирования на атомном уровне. В условиях термодинамического равновесия большинство материалов находятся в кристаллическом состоянии, обладающем дальним порядком и симметрией. Знание структуры материала является фундаментальным при понимании свойств материала. Однако предсказание кристаллической структуры оказалось вызовом для исследователей.

Компьютерный дизайн материалов является возникающим полем исследований, при котором главной задачей является предсказание кристаллической структуры, приводящей к стабильной кристаллической структуре с требуемыми характеристиками в заданном пространстве конфигураций. Поиск новых материалов с требуемыми свойствами может быть отождествлен с проблемами глобальной оптимизации, в которых могут быть использованы многие схемы машинного обучения и математической оптимизации. В целом, современные стратегии могут быть разделены на две категории: оптимизационно-ориентированные схемы и поиско-ориентированные схемы. Оптимизационно-ориентированная схема фокусируется на точности оптимизационного алгоритма в редуцированном мульти-размерном пространстве. С другой стороны, поиско-ориентированные методы пренебрегают врожденной сложностью химической системы материала и предполагают, что все возможные архетипы кристаллической структуры могут быть найдены как возможные аналогии в имеющейся в наличии базе данных структур. Независимо от подхода предсказание кристаллической структуры является чрезвычайно высоко-размерностной оптимизационной проблемой, и потому полное решение проблемы трудно находимо. В последние годы эволюционные алгоритмы, воспроизводящие эволюцию Дарвина и использующие естественный отбор сильнейшего были успешно при открытии новых составов при окружающих условиях, в существование которых ранее не верили.

III-2 Нано-материалы:

Наноккомпозитами называют композиционные материалы, у которых по крайней мере один из размеров армирующих элементов имеет порядок нанометров. Эти композиционные материалы являются многообещающими не только из-за их превосходящих механических свойств, но также из-за превосходящих тепловых,

электрических, оптических и других характеристик, а также обычно относительно малых долей армирующих материалов относительно количества связующего. Принципиальными причинами превосходящих свойств нанокомпозитов являются:

- Свойства нано-элементов армирования значительно выше свойств обычно используемых волокон и
- Отношение их поверхности к объему очень велико, что улучшает интерфейсное взаимодействие со связующим.

Примеры элементов нано-армирования включают:

- Наноглины (слоистые силикаты),
- Углеродные нановолокна
- Углеродные нанотрубки
- Полихедральные олигомерные силсесквиоксаны,
- Металлы
- Металлооксидные керамики
- Металло-бескислородные керамики, и т.д.

Например, углеродные нанотрубки являются нано-структурными углеродными материалами, имеющими чрезвычайно высокий модуль Юнга и механическую прочность, также как и превосходящие электро- и теплопроводности. Добавка малого количества углеродных нано-трубок к металлам, керамике и полимерным матрицам формирует нанокомпозиты с высокими механическими и физическими характеристиками. Тем самым комбинация специальных свойств (механических, тепловых, электрических) углеродных нанотрубок делает их идеальным армирующим для различных матриц и широко круга возможных применений.

В качестве примера экстраординарных свойств нанокомпозитов мы можем привести:

- Эпоксидные нанокомпозиты с армированием углеродными волокнами и наноглиной показывают 85% увеличение вязкости разрушения достигнутое введением наноглины в связующее,
- 30% увеличение вязкости разрушения стали достигнутое замещением карбидов кластерами мелкозернистых карбидов,
- 80% улучшение вязкости разрушения углепластика за счет использования углеродных нанотрубок,

- Значительное улучшение модуля упругости, прочности на сжатие и межслоевой прочности углепластика при введении углеродных нановолокон,
- 30% увеличение межслоевой сдвиговой прочности углепластиковой ткани при осаждении мульты- и одностенных нанотрубок на волокнах,
- 45% увеличение сдвиговой прочности стеклопластика при использовании нанотрубок,
- Межслоевая вязкость разрушения возросла на 76%, а прочность на 9% в полимерном композиционном материале при использовании радиально ориентированных углеродных нанотрубок как между монослоями, так и в монослоях,
- 80% увеличение прочности на растяжение в иерархической Mg матрице, армированной композиционным материалом с Al матрицей и нано-глиноземными частицами.

Суммируя, применение нано-добавок значительно улучшает механические, тепловые, электрические, оптические и др. свойства композиционных материалов.

Углеродные нанотрубки: Открытие углеродных нанотрубок (УНТ) Ииджимой открыло новые перспективы в разработке композиционных материалов благодаря их уникальным механическим, электрическим и тепловым свойствам. Непреложным фактом служит высокий модуль Юнга до 1.3ТПа и прочность до 50ГПа, что делает УНТ армированием с чрезвычайно высокими механическими свойствами. Более того, УНТ обладают очень высокой теплопроводностью и электропроводностью. В последние годы исследования фокусируются на создании армированных нано-трубками полимеров, металлов и керамик. В добавок ряд исследований был выполнен для нано-трубок, покрытых металлами и нанотрубках, заполненных металлическими частицами.

Свойства УНТ

	Модуль Юнга (ГПа)	Прочность на растяжение (ГПа)	Плотность (г/см ³)
ОСНТ	1054 ^а	75 ^а	1.3
пучок ОСНТ	563		1.3
МСНТ	1200 ^а		2.6
графит	350	2.5	2.6
P-100 уг. вол.	758	2.41	2.15

^а Теор. зн-я

Многие исследования показали, что при надлежащем распределении УНТ в полимерной матрице значительное улучшение механических свойств может быть

достигнуто по сравнению со свойствами полимера. Так, добавка 5 wt% МСНТ привело к увеличению модуля упругости полистирольного композиционного материала на 120% и прочности на растяжение на 57% по сравнению со свойствами полистирола.

Растяжение, МСНТ-полистирол

	Модуль упругости (ГПа)	Прочность на растяжение (МПа)
Полистирол	1.53	19.5
Полистирол+ 1 wt% МСНТ	2.1	24.5
Полистирол+ 2 wt% МСНТ	2.73	25.7
Полистирол+ 5 wt% МСНТ	3.4	30.6

Source: From Safadi, B., Andrews, R., and Grulke, E.A., *J. Appl. Polym. Sci.*, 84, 2660, 2002.

Другой пример, результаты которого представлены в таблице ниже, исследует МСНТ-полиамид-6 композиционный материал. Как модуль упругости, так и прочность на растяжение значительно выше по сравнению со свойствами полиамида-6.

Растяжение, 1 wt% МСНТ-Полиамид-6

	Полиамид-6	1 wt% МСНТ + Полиамид-6
Модуль упругости (ГПа)	0.396	0.852
Текучесть (МПа)	18	40.3
Предельное удлинение	>150	125

Source: From Zhang, W.D., Shen, L., Phang, I.Y., and Liu, T., *Macromolecules*, 37, 256, 2004.

Третий пример рассматривает свойства на растяжение эпоксидного композиционного материала, армированного 1 wt% МСНТ. Добавка МСНТ лишь немного улучшила модуль, но прочность на растяжение и предельное удлинение значительно повысились.

Свойства на растяжение, эпокс. КМ 1 wt% МСНТ

	Модуль Юнга (ГПа)	Прочность на растяжение (МПа)	Предельное удлинение (%)
Epoxy	1.21	26	2.33
Untreated МСНТ-epoxy	1.38	42	3.83
Acid-treated МСНТ-epoxy	1.22	44	4.94
Amine-treated МСНТ-epoxy	1.23	47	4.72
Plasma-treated МСНТ-epoxy	1.61	58	5.22

Source: From Kim, J.A., Seong, D.G., Kang, T.J., and Youn, J.R., *Carbon*, 44, 1898, 2006.

Одно-стенные углеродные нанотрубки (ОСНТ) также представляют значительный потенциал как базовый материал для армирования. Исключительные механические свойства ОСНТ вызвали интенсивные исследования данного материала для использования в ракетно-космической, авиационной, автомобильной промышленности, а также широком спектре направлений от изделий военного назначения до применения в медицине. Однако ОСНТ композиционные материалы, полученные смешиванием показывают только скромное увеличение прочности при сравнении с другими наноматериалами.

Хотя был достигнут значительный прогресс, механические характеристики полимеров с добавками ОНТ все еще значительно ниже ожидаемых и потенциально возможных. С другой стороны, новый подход к изготовлению, основанный на последовательной выкладке химически модифицированных нанотрубок и полиэлектролитов может значительно уменьшить сегрегацию фаз и сделать композит на основе ОНТ более однородным. В сочетании с химическим сшиванием этот процесс ведет к значительному повышению механических характеристик. Прочность такого композиционного материала на растяжение в несколько раз превышает прочность композита на основе ОНТ, полученного путем смешивания и приближается к величинам, характерным для твердой керамики. Универсальность этого многослойного подхода, примененного к широкому спектру функциональных материалов делает возможным успешное внедрение ОНТ в различные композитные материалы для придания им необходимых механических характеристик.

Внедрение продуктов на основе УНТ была ограничена высокой стоимостью и малыми объемами их производства, но оба эти ограничения успешно преодолеваются в настоящее время. Большая часть коммерческой деятельности основана на применении многостенных углеродных нанотрубок и тесно связана с углеродными нановолокнами (УНВ). Одностенные углеродные нанотрубки пока отстают. Хотя высокая стоимость внедрения характерна для всех УНТ, барьер, стоящий перед ОНТ существенно выше, так как их стоимость в 50-100 раз превосходит стоимость МНТ и УНВ. Однако цены на все виды углеродных наночастиц постепенно снижаются так как объемы их производства растут.

Число компаний, занимающихся УНТ значительно возросло с истечением сроков действия патентов, принадлежащих пионерам рынка углеродных нанотрубок Nupregion Catalysis International. Недавно компания Bayer Material Science представила новую технологию промышленного получения МНТ с достаточной чистотой и значительно меньшей стоимостью. Другие ключевые игроки здесь - французская компания Arkema,

бельгийские Nanocyl и Pyrograf Products, расположенная в Сан-Диего Ahwahnee Inc., две компании из Южной Кореи - Carbon Nano-Material Technology и Ijjin Nanotech, японская Showa Denka и два поставщика из Северной Америки - Raymor Industries Inc. в Канаде и Unidym Inc. В США.

Компания Vorbeck Materials Corp. лицензировала технологию, разработанную в Принстонском университете, позволяющую осуществлять экономичное промышленное производство проводящих слоев графита и графена для использования в качестве «многофункциональных» фильтров. Графеновые нанонаполнители Vor-x могут похвастаться сочетанием механических и электрических характеристик, превосходящих аналогичные характеристики углеродных нанотрубок при изоляционных и теплофизических свойствах аналогичных наноглинам.

Сегодня более ста компаний по всему миру производит УНТ и ожидается, что это число возрастет более чем до двухсот в течение следующих пяти лет. В настоящее время доля УНТ составляет около 30% от общего спроса на все наноматериалы. Основные производители углеродных нанотрубок и их годовые объемы производства в 2010 году приведены в следующей таблице. Тем временем, компаний и институтов, активно занимающихся исследованиями в области УНТ уже более тысячи.

	Производитель	Годовой объем производства, тонн	Производственный процесс	Страна
Одностенные углеродные нанотрубки	Unidym, Inc. (acquired by Wisepower Co.), http://www.unidym.com	1.5	High-pressure carbon monoxide (HiPco)	USA
	Toray Industries, Inc. http://www.toray.com	1.5	CCVD	Japan
	Mitsubishi Rayon Co. Ltd. http://www.mrc.co.jp/english/index.html	1.2	CVD	Japan
	SouthWest NanoTechnologies Inc. http://www.swentnano.com	1.0	Cobaltmolybdenum catalyst (CoMoCAT)*	USA
	Kleancarbon Inc. http://www.kleancarbon.com	1.0	CVD	Canada
Много-стенные углеродные нанотрубки	Showa Denko K.K. http://www.sdk.co.jp/english	500	CCVD	Japan
	CNano Technology Limited http://www.cnanotechnology.com	500	CCVD	USA
	Nanocyl S.A., http://www.nanocyl.com *	400	CCVD	Belgium
	Bayer MaterialScience AG http://www.bayermaterialscience.com	260	CCVD	Germany
	Arkema Inc. http://www.arkema-inc.com	50	CCVD	France
	Hyperion Catalysis International, Inc. http://www.hyperioncatalysis.com	50	CVD	USA

Первые промышленные применения состояли в основном во введении в матрицу хаотично расположенных углеродных нанотрубок аналогично композитам, армированным короткими волокнами. Большая часть работ в Zyvex Corp. проводилась и термореактивными матрицами, такими как эпоксидная и полиуретановая. Успешный пример использования наночастиц Nanosolve - композитный стержень клюшки для гольфа, разработанный компанией Aldila Inc. из Калифорнии. Стержень изготовлен из препрега на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего с добавлением 0,5-1,5% наночастиц Nanosolve. Другим примером является использование эпоксидных матриц, наполненных угле- или стекловолокном в мачтах гоночных яхт, разработанных Synergy Yachts, в которых небольшие добавки наночастиц позволили значительно повысить жесткостных характеристики мачты. Также повышение механических характеристик при введении наночастиц проявилось в битах, изготавливаемых Easton Sports, в которых наномодифицированное связующее использовано для изготовления всей

биты. Также этой компанией изготавливаются хоккейные клюшки, в которых наномодифицированное связующее использовано в черенке и крюке. Компания Easton-Bell Sports, Inc. вместе с Zyvex Performance Materials использовала углеродные нанотрубки в ряде своих деталей для велосипедов, таких как руль, звездочки, вилки и рама.

Другой целью для улучшений являются аэрокосмические конструкции из стекло- и углепластиков. Внедрение частиц Nanosolve приводит к значительному повышению прочности при сжатии и изгибе и модуля упругости. Был разработан ряд изделий из термопластов, предназначенных для защиты от ударов, в том числе бронезащиты.

Компания Zyvex Technologies также построила морское судно, Piranha Unmanned Surface Vessel, чтобы показать, что становится возможным с использованием УНТ. УНТ помогли улучшить конструктивные свойства судна, которое при массе 8000 фунтов, способно перевозить груз массой 15000 фунтов на расстояние 2500 миль.

Компания Amroy Europe Oy изготавливает наномодифицированное эпоксидное связующее марки Hybtonite, в котором углеродные нанотрубки химически активируются для образования связей с эпоксидной смолой, в результате чего получаемый композиционный материал становится на 20-30% прочнее аналогов. Это связующее используется для изготовления ветряков, морских красок и спортивного инвентаря, такого как лыжи, хоккейные клюшки, бейсбольные биты, охотничьи стрелы и доски для серфинга.

Тем временем, использование УНТ для электростатически окрашиваемых наружных панелей кузова автомобилей стало значительным прорывом. Пластиковые детали должны обладать достаточной электропроводностью чтобы обеспечивать заземление и при электростатическом окрашивании краска равномерно покрывала и пластиковые и примыкающие металлические панели. Для таких деталей применение нанотрубок – лучший способ обеспечить их электропроводность при сохранении необходимых свойств, таких как прочность, чтобы деталь не разрушилась при низких температурах.

В США и других странах УНТ коммерчески применялись для отвода статического электричества в различных пластиковых деталях, находящихся в контакте с движущимся топливом – начиная от топливопроводов до топливных насосов.

В электронике УНТ использовались при создании чистых комнат, в которых изготавливаются микросхемы и жесткие диски, так как пластиковые части в них не должны накапливать статическое электричество и, соответственно, пыль. Производители

установили, что чистота поверхности – основное преимущество углеродных нанотрубок по сравнению с рублеными углеродными волокнами, так как их меньшие размеры обеспечивают значительно более равномерную электропроводность.

Возможность создавать электропроводные полимерные композиционные материалы без потери их механических свойств, таких как прочность, позволяет создавать полностью новые продукты, такие как гибкие, прозрачные и проводящие пленки для электроники (например, сенсорных экранов).

В следующей таблицы перечислены основные области применения УНТ в настоящее время, ближайшей и дальней перспективе (см. M. Endo, M. S. Strano and P. M. Ajayan, "Potential Applications of Carbon nanotubes" Topics in Applied Physics, 111(2008) 13-61.). Применения разделены по масштабам.

	Большой объем применений	Малый объем применений	Ключевые особенности
Настоящее время	Спортивные товары: клюшки для гольфа, теннисные ракетки, бейсбольные биты, добавки в электроды батарей, пластики, топливные системы	Электроды батарей, палубы и корпуса кораблей, лопасти ветряных электростанций, препреги, наконечники сканирующих микроскопов, плоские экраны, ткани, печать и упаковка	Высокие механические и электрические характеристики, совместимость, большая площадь поверхности (около 1000 м ² /г), высокая химическая стойкость в кислотных средах, оптико-электронные свойства,
Ближайшая перспектива (менее 5 лет)	Электроды суперконденсаторов, прозрачные проводящие пленки, экраны LCD и OLED, электроды топливных элементов, чернила	Устройства электромеханической памяти, водородные электроды, биосенсоры, массивы источников рентгеновского излучения, контакты,	нечувствительность к электромиграции, хорошая теплопроводность

	для печати, клеи	системы управления температурой	
Дальняя перспектива (Более 5 лет)	Электрические кабели, композитные аэрокосмические и автомобильные конструкции, фотоэлементы	Полевые транзисторы, соединения, гибкая электроника, системы доставки лекарств в организме	

Наноглины: Разработка гибридных композиционных материалов, включающих в себя нанофазы, очень перспективна для создания легких материалов с улучшенными свойствами. Волокнистые композиционные материалы с наномодифицированной матрицей обладают значительно большей прочностью и сопротивлением усталости, чем обычные композиты.

Наполнитель, применяемый в композитных материалах с наноглиной – это слоистая силикатная глина, например, отбеливающая глина, которая принадлежит к семейству силикатов, известных как 2:1 филлосиликаты. В естественном виде частицы слоистой отбеливающей глины имеют толщину 6-10 нм и содержат более 3000 плоских слоев. В отличие от таких материалов, как тальк и слюда, отбеливающую глину можно расслоить на отдельные слои толщиной около 1 нм. Площадь поверхности каждой расслоенной частицы наноглины около 750 м²/г при соотношении сторон более 50.

Способность отбеливающей глины значительно повышать механические характеристики демонстрирует в следующей таблица.

Свойства Полиамида-6, наполненного наноглиной

	Массовая доля глины, %	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Температура деформации под давлением 145 МПа, °C
Полиамид-6 (ПА-6)	0	69	1,1	2,3	65
ПА-6 с	4,2	107	2,1	2,8	145

расслоенной наногилной					
ПА-6 с нерасслоенной наногилной	5,0	61	1,0	2,2	89

Источник: Kato M., Usuki A. *Polymer-Clay Nanocomposites*. T.J. Pinnavai and G.W. Beall., Eds. John Wiley & Sons. Chichester, UK, 2000.

Наиболее заманчивым результатом добавления наноглин в полимеры является повышение модуля упругости, которое может быть достигнуто при введении массовой доле наноглины равной всего 1-5%. Существует множество других преимуществ, таких как снижение газопроницаемости и увеличение термостабильности и огнеупорности. Ключом к достижению улучшенных свойств является расслоение наноглины. Равномерное распределение наноглины и взаимодействие между ней и полимерной матрицей также являются важными факторами, которые особенно влияют на прочность при растяжении, предельную деформацию и ударную вязкость.

Немаловажным фактором является равномерность распределения наноглины, а так же взаимодействие между наноглиной и полимерной матрицей, в особенности влияние этих факторов на прочность при растяжении, удлинение при разрыве и ударную стойкость.

Промышленное применение наноглины востребовано в различных отраслях, включая аэрокосмическую и авиационную промышленность, производство огнезащиты, автомобильную промышленность, биоматериалы, медицинские изделия, упаковку и др.

Крупнейшим рынком наноглины, в части как производства, так и потребления, в настоящее время является Северная Америка, в части потребления – Азиатско-Тихоокеанский регион. Композиты, произведённые с использованием наноглины, наиболее широко используются в аэрокосмических и автомобильных приложениях. Данный сегмент показывает наибольший рост в этих регионах. Так же композиты на основе наноглины востребованы в ветряной энергетике.

Глобальный рынок наноглин в основном контролируется несколькими транснациональными корпорациями. Компании, игроки рынка, должны обладать высокими технологиями, необходимыми для производства наноглины, и, как следствие, капитальные вложения в производство и его стоимость достаточно высоки, что, в свою очередь, ограничивает возможности выхода на рынок небольших компаний. Среди

наиболее крупных игроков в данной индустрии можно назвать, среди прочих, FCC China, Southern Clay Products Inc., Techmer, Nanocor Corporation, Elementis Specialties, Kowa Company Ltd., Sum Chemical, Unicoop, Ube Industries и Kunimine Industries Co. Ltd.

Углеродные нановолкна: Углеродные нановолкна (УНВ) производятся либо путем выращивания из газовой фазы, либо методом электроспиннинга. Углеродные нановолокна, выращенные из газовой фазы (ГФУНВ) в настоящее время вызывают наибольший интерес с точки зрения коммерческого применения. Такие волокна имеют, как правило, диаметр от 20 до 200 нм и длину от 30 до 100 мкм. Для сравнения, традиционные ПАН или пековые углеродные волокна имеют диаметр от 5 до 10 мкм и производятся непрерывно по длине. Углеродные волокна так же изготавливаются методом выращивания из газовой фазы, но их диаметр в этом случае находится в диапазоне от 3 до 20 мкм.

В общем случае, при внедрении УНВ в термопласты удается достигать некоторого увеличения модуля упругости и прочности, в то время как при внедрении УНВ в реактопласты были получены более скромные результаты. Экономический эффект от УНВ следует в целом тенденции УНТ.

III-3 Микромеханическое проектирование компонент:

Микромеханическое проектирование компонент привлекает все большее внимание со стороны научного сообщества и промышленности. Возможности оптимизации эксплуатационных характеристик путем варьирования типов армирующих компонент, объемной доли и типа укладки в настоящее время практически исчерпаны. С другой стороны, улучшение одной из характеристик, например, жесткости, в общем случае, вызывает снижение другой – трещиностойкости. Поэтому новые подходы вызывают все больший интерес в последние годы.

Микромеханическое проектирование компонент предоставляет возможность проектирования материалов на микромасштабном уровне. Посредством управления внутренней структурой можно получать материал с исключительной жесткостью, прочностью, трещиностойкостью и иными механическими характеристиками. Например, в процессе формования композитов с короткими волокнами путем выбора ориентации волокон, длины волокон и их распределения обеспечивается достижение требуемых механических характеристик. В качестве других примеров можно привести так же процессы непрерывной намотки, создания гибридных композитных материалов,

композитов с иерархической структурой, тканых, плетеных и вязанных текстильных преформ.

В первую очередь, необходимо учитывать, что механические характеристики композиционного материала определяются не только типом и объемным содержанием армирующего наполнителя, но так же и геометрией:

- непрерывные или короткие волокна, частицы.
- локальная ориентация волокон
- однонаправленный слой или текстильная преформа
- 1D, 2D или 3D конструкция схемы армирования
- соотношения между схемой армирования и формой проектируемой конструкции.

Другой немаловажный аспект заключается в том, что при комбинировании разных типов волокон в гибридных композиционных материалах или применении специально спроектированы схем армирования в материалах с иерархической структурой, оптимизируются эксплуатационные характеристики материала. Таким образом, управляя одновременно геометрическими характеристиками и составом армирующей структуры, возможно, создавать материалы с превосходными механическими характеристиками.

Гибридные композиты: гибридными называются композиционные материалы, сочетающие в себе различные типы связующих и армирующих компонент. Преимущества гибридных композитов заключаются в следующем:

- обладают лучшими механическими характеристикам по сравнению с обычными композитами.
- Позволяют частично заменить дорогостоящие армирующие материалы более дешевыми без существенного снижения механических характеристик материала
- Путем комбинирования высокомодульных волокон с податливыми, обеспечивается возможность оптимизации баланса между прочностью и жесткостью материала.

Среди других вероятных преимуществ, можно отметить повышенную трещиностойкость и ударную прочность, более высокую прочность надрезов и усталостную прочность.

Существует несколько типов гибридных материалов:

- Различные типы армирующих компонент переплетены в ткани.
- Различные типы армирующих компонент перемешаны в виде однонаправленного слоя
- Каждый тип армирующего компонента или связующего формирует собственный слой, а затем они соединяются в слоистый композит.

Так же встречаются слоистые материалы, сочетающие металлические и клеевые слои.

На следующем рисунке изображена зависимость коэффициента концентрации для кругового отверстия в гибридном угле-стекло-пластиковом композите от приведенного расстояния до отверстия.

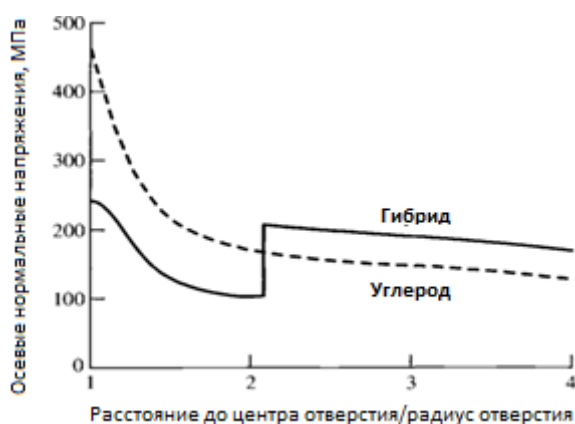


Рисунок 1: Величина коэффициента концентрации в гибридном угле-стекло-пластиковом композите в сравнении с углепластиковым.

Наиболее эффективным способом увеличения ударной сопротивляемости низкодеформативного волокнистого композита является его гибридизация при помощи высокодеформативных волокнистых слоев. Например, поведение углеволокна GY-70 при низкоэнергетическом ударе, характеризуется наличием хрупкой формы разрушения. При этом гибридный сэндвич-композит, содержащий слои углеволокна GY-70 в качестве наружной обшивки и стеклопластиковые слои в качестве заполнителя, способен выдержать удар с энергией, в 35 раз превышающей максимальную энергию для GY-70 (Рисунок 2). Увеличение ударной сопротивляемости вызвано расслоениями в интерфейсе между углепластиковой обшивкой и стеклопластиковым заполнителем.

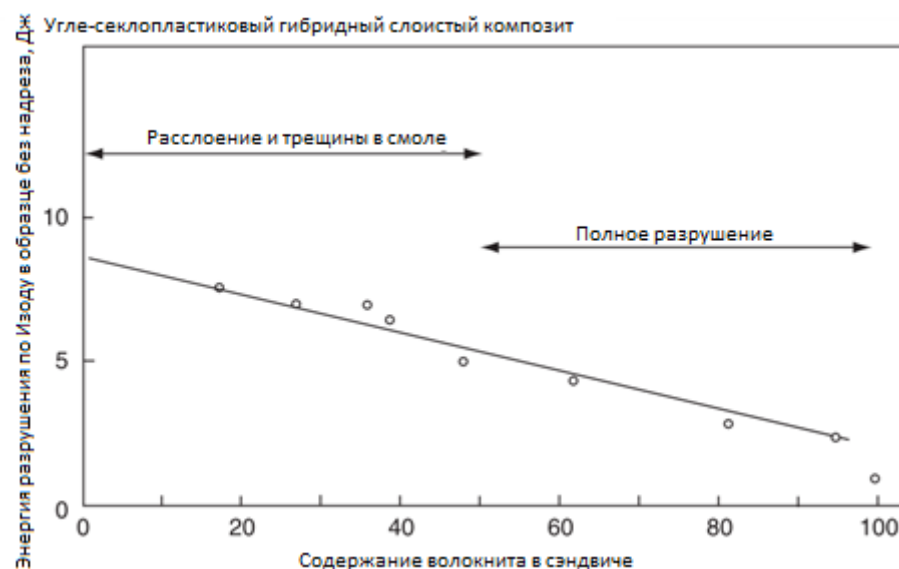


Figure 2: Hybridization of the high-modulus carbon fibers with the E-glass fibers leads to a 35 times higher impact resistance.

Применение гибридных композитов наиболее востребовано в коммерческом самолетостроении. В самолетах, по сравнению с другими транспортными средствами, выдвигаются более строгие требования к безопасности и весовым характеристикам. Их удается удовлетворить благодаря использованию материалов со специфическими характеристиками. Угле/стеклопластиковые композиты наиболее часто применяются для создания гибридных материалов. В случаях, когда высокие значения модуля упругости играют меньшую роль, выбор гибридных материалов является естественным в связи с их меньшей стоимостью. Композиты с эпоксидной матрицей используются в авиастроении для повышения эксплуатационных характеристик системы. Двери кабины пилотов самолетов так же делается из гибридных композитов, а так же используются в последнее время и в других транспортных системах. Борографитные гибридные материалы изначально проектировались для элементов боевых самолетов, и до последнего времени доля их применения в гражданском самолётостроении была незначительна. Среди более современных материалов, расширяющих горизонты проектирования авиационных конструкций, можно отметить углеродные волокна в различных формах, и, в меньшей степени, арамидные волокна. В отличие от более дешевого, менее привлекательного с конструктивной точки зрения стекловолокна, использование которого распространено достаточно сильно. Это особенно верно в случае планеров – конструкция большинства планеров сейчас почти полностью состоит из гибридных материалов.

В настоящее время, гибридные волокна (углерод, стекло) часто используются для изготовления лопастей в ветровой энергетике.

Новое поколение кораблей для военно-морского флота нуждается в технологиях изготовления корпусов-«невидимок»; в особенности таких, которые обеспечивают лучшие магнитные, акустические гидродинамическое, радио- и температурные характеристики. Единственным способом решить эту задачу, является применение при создании корпусов при помощи гибридных конструкционных волокнистых композитов. Гибридные композиты так же обладают большим количеством преимуществ перед углеродистой сталью, включая более высокую удельную прочность, пониженные требования к обслуживанию и возможность формования более сложных форм. Гибридные композитные корпуса так же предоставляют некоторые преимущества по части незаметности. Помимо этого, они так же обладают более высокой живучестью и увеличенной усталостной долговечностью.

В гражданском строительстве, исследования и разработки в области гибридных полимерных композиционных материалов (ПКМ) так же существенно продвинулись за последнее десятилетие. Первый полностью гибридный ПКМ мост был построен в Окинаве, Япония в 2001 году. Все конструкционные элементы этого сооружения были выполнены с применением гибридных волокнистых ПКМ (стекло- и углепластиков). Полностью гибридное решение было выбрано из-за высоких требований по коррозионной стойкости, так как мост окружен океаном.

Текстильные конструкционные композиты: возрастающий интерес к текстильным композитам вызван возможностью повышения межслоевой прочности и устойчивости к разрушению композитных материалов. Кроме того, вариабельность текстильных преформ позволяет оптимизировать эксплуатационные характеристики материала.

Наиболее распространёнными текстильными технологиями являются плетение, вязание, ткачество и шитье. Текстильные преформы могут быть как двухмерными, так и трехмерными.

Основным преимуществом применения текстильных композитов является наличие армирующих элементов в направлении «из плоскости», которые существенно снижают межслоевые расслоения, практически уничтожая роль этой формы разрушения от критической до незначительной, и, тем самым, увеличивая сопротивление материала усталости и разрушению.

Помимо этого, текстильные структуры позволяют реализовывать произвольную геометрию, обеспечивая изготовления деталей сложной формы с необходимыми отверстиями без повреждения армирующего материала. Например, было показано. Что

прочность образца с надрезом с заформованными отверстиями может на 40% превышать аналогичную величину для образца с высверленными отверстиями.

Композитные материалы с иерархической структурой. Развитие композитов с иерархической структурой и многомасштабных методов их моделирования связано с исследованием биоматериалов (таких как дерево, кости, натуральные волокна и др.), в которых внутренняя структурная иерархия обеспечивает экстраординарную прочность, трещиностойкость и другие характеристики. В качестве примеров иерархических материалов можно привести многие наноструктурированные материалы, более подробному описанию которых посвящен другой раздел настоящего отчета.

Типичным микромеханическим примером иерархического материала может послужить нить. Нити состоят из различных одномерных волокон. Нити, содержащие только одно волокно, называются монофиламентными. Некрученые, толстые нити называются пучками. Площеные пучки называются ровингами; в текстильной технологии это слово так же обозначает промежуточный продукт в навивке. Аппретирование (шлихтование) удерживает волокна вместе и облегчает обработку волокон; так же оно улучшает адгезию волокна к смоле в композите. В крученых нитях, волокна удерживаются вместе благодаря силам трения, возникающим в процессе скрутки. Для крученых нитей из штапельных волокон этот процесс называется прядением и включает в себя длинную цепочку технологических операций. Существуют различные технологии прядения (кольцевое, пневмомеханическое, фрикционное), каждая из которых приводит к получению нитей с различным внутренним распределением волокон. В одной нити посредством прядения могут быть смешаны волокна различных видов; помимо несущих волокон, таким образом в нить могут быть внедрены, в том числе, волокна термопластика. Наконец, несколько стандартных нитей могут быть сплетены вместе, образуя кручёная комплексная нить.

Еще одним примером такого рода материала является иерархическая кластеризация волокон, состоящих из пучков из пучков волокон и смешения армирующих волокон и частиц.

Стойкость к повреждениям многомасштабных самоподобных волокнистых композитов обычно увеличивается с увеличением количества иерархических уровней в материале.

III-4 Проектирование на макроуровне:

Проектирование материала на этом уровне было наиболее распространенной практикой что сложилось исторически при проектировании композитных деталей. Как было кратко отмечено ранее, направленные свойства армированных волокнами слоев материала сделали возможным повысить жесткость и прочность материала до свойств слоя в направлении волокон, если одинаково уложить все слои в желаемом направлении, как показано на Рис. 3-а. В таком случае свойства были бы низкими в перпендикулярном к волокнам направлении, поскольку низкими являются свойства армированного волокнами материала в направлении перпендикулярном направлению волокон. Решением (а, следовательно, возможностью проектирования) является укладка множества слоев однонаправленного материала с разной угловой ориентацией (Рис. 1-б) так, чтобы получить желаемые свойства в желаемых направлениях. Следует отметить, что увеличивая количества слоев с ориентацией «+» по сравнению с числом слоев с ориентацией «-», или задавая углы ориентации слоев несимметрично относительно срединной плоскости, проектировщики могут также получить смешанный деформативный отклик, что не может быть достигнуто для однородного материала.

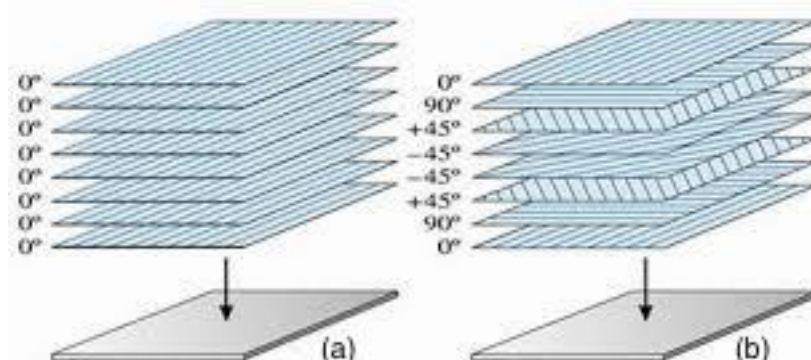


Рисунок 6: Макроскопическое проектирование слоистого композита посредством последовательности укладки; (а) однонаправленный и (б) перекрестно армированный слоистые композиты

Следующим уровнем усложнения проектирования было изменение свойств материала от одной дискретной области проектируемого элемента конструкции к другой, как показано на Рисунке 4. Последовательность укладки слоистого композита с точки зрения числа слоев, а также углов ориентации должна быть изменена для достижения этой цели. Очевидно, необходимо поддерживать технологичность с точки зрения непрерывности ориентации углов при пересечении границ различных областей детали, как это легко можно заметить из схемы на рисунке слева. Более важной особенностью этого вида проектирования с точки зрения перспективных технологий является "аддитивный"

характер этого производства. То есть, в отличие от изменения толщины детали от одной области к другой путем механической обработки материала, как это было бы сделано в большинстве монолитных материалов, толщина детали изменяется путем добавления слоев в различных областях. Следовательно, можно утверждать, что производство композитов является преимущественно аддитивным, и если изменение толщины композита осуществлять механической обработкой, то полученный разрыв поверхностных волокон может существенно снизить прочностные свойства материала из-за возможного отслоения поверхностных слоев под действием эксплуатационных нагрузок.

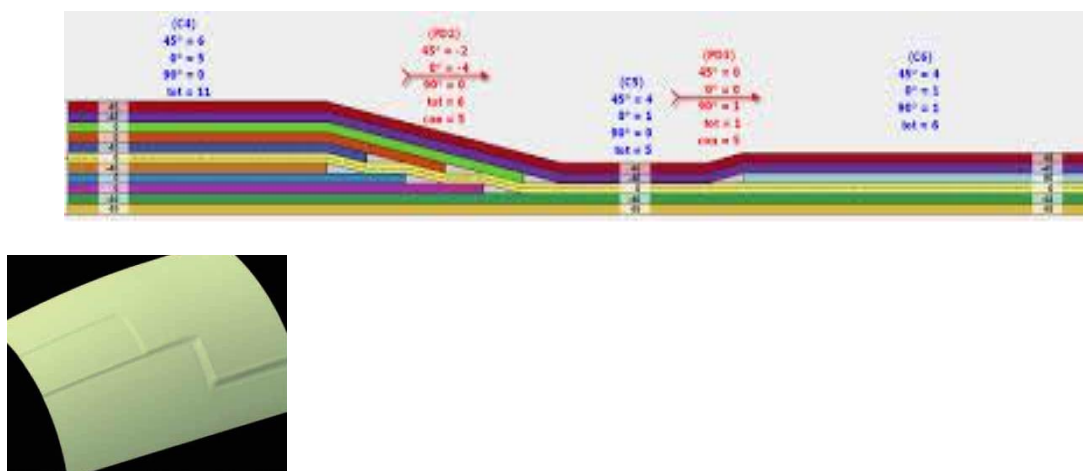


Рисунок 7: Проектирование свойств материала в разных дискретных областях

Самое последнее преимущество в проектировании и производстве слоистых композитов было достигнуто за счет расширения описанных в предыдущем абзаце концепций непрерывного изменения свойств по всей области композитной детали. Это достигается путем управления углами ориентации слоев (см. Рис. 5) с использованием автоматического оборудования, как будет описано в следующем разделе. Основное преимущество этого подхода состоит в том, что конструкторы теперь имеют очень большое количество проектных переменных (теоретически, их число может быть бесконечно большим, что препятствует технологичности создания непрерывных путей ориентации волокон) даже для одного слоя композита, который представляет собой сложный конструктивный элемент. Чем больше число проектных переменных, тем большую гибкость имеют конструкторы, чтобы оптимально адаптировать свойства материала к потребностям условий проектирования. В композитных конструкциях хорошо известно, что нагрузки следуют в направлении жесткости волокон, что приводит к возможности проектирования путей нагрузок в конструкции, которой опять же не было

бы для монолитных материалов без изменения их толщины путем сложной механической обработки.

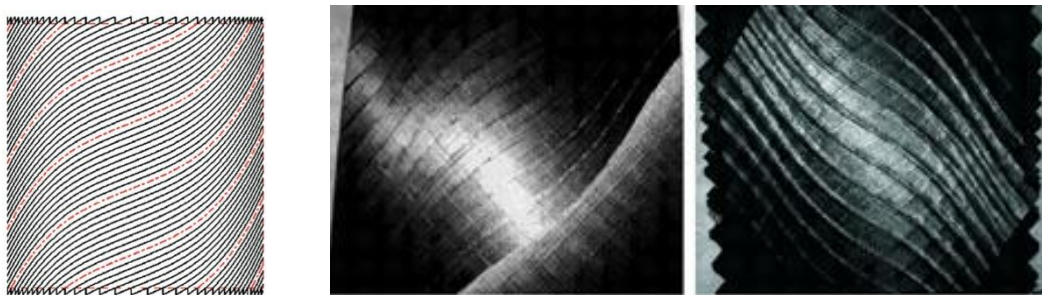


Рисунок 8: Слоистые композиты переменной жесткости с управляемой ориентацией волокон, полученные с использованием автоматизированной выкладочной машины

IV. Производство проектируемых материалов и конструкций: тенденции и возможности

Некоторые элементы двойственности между проектированием и производством композитов, подразумеваемые во вводной части этого отчета могут быть поняты из предыдущих дискуссий о проектировании. В этом разделе мы расширим производственные тенденции и закончим отчет возможностями, которые могут подключить академических исследователей к инновациям и промышленных исследователей, чтобы разработать надежные производственные программы.

Несомненно, исследования по проектированию материалов на атомных и наномасштабах являются темами, представляющими существенный интерес в данный момент, и исследователи во всем мире конкурируют, чтобы получить все большее и большее количество нано-структурных материалов, которые могут быть использованы для применения в электронике, чтобы нагружать несущие конструктивные элементы. В частности, восходящие подходы, которые основаны на физико-химических принципах молекулярной или атомной самоорганизации, в отличие от нисходящих подходов традиционных методов механико-физического дробления для получения наночастиц могут проложить путь для нанопроизводства экосистемы, в результате в перспективе могут появиться ноу-хау и технологии, ведущие к производственной конкурентоспособности и превосходству. Нисходящими подходами, как известно, производят выбранные и более сложные структуры из атомов или молекул, с лучшим размером и формой управления наноструктурными материалами. В дополнение к преимуществам этих материалов в улучшении свойств материалов, используемых для повседневных приложений, таких как прочность, удельный вес, прочность,

электропроводность, поглощение энергии, бактериальная и микробиологическая сопротивляемость и т.д., ожидается, что они получат большое применение и внедрение в электронике, производстве и хранении экологически чистой энергии, информационных технологиях и в решении экологических проблем.

Исходя из вышеизложенного краткого обсуждения, нет никаких сомнений в том, что производственные инициативы займут высокий приоритет в этой высоко научной области атомных и наноструктурированных композиционных материалов. То, что, пожалуй, не является очевидным – это потенциал для краткосрочных инновационных и производственных достижений в традиционном микро- и макроскопическом производстве композитов, которые могут привести к экономически эффективному и высококачественному массовому производству товаров народного потребления. Несмотря на то, что современные композиционные материалы окружают нас в течение более чем четырех-пяти десятилетий, производство деталей и компонентов из этих материалов, особенно для массовой рынках, были в основном в своих предысторических этапах за тот же период. Удивительно, что многие промышленные приложения, за исключением нескольких специфических ниш, полагались на технологию ручного производства. Среди нишевых приложений, которые привлекали полуавтоматизированные или автоматизированные производственные технологии на ранней стадии, являются мотанные цилиндрические и круглые баллоны, полученные намоткой жгутов или пучков нитей на выпуклую поверхность сосуда по геодезическим или окологеодезическим путям.

Другой линией нишевого продукта было пултрузионное производство, которое относилось либо к однонаправленным волокнистым композитам, либо к трикотажным и / или тканым заготовкам, которые вытягиваются через отверждающую фильеру для отверждения мокрой смолы.

Использование более высокоточной, более сложной техники для производства больших площадей покрытия композитных деталей и конструкций появилось только в начале 90х с появлением машин автоматизированной выкладки лент (АВЛ) и автоматизированной выкладки волокна (АВВ).

Процессы АВЛ и АВВ похожи. АВВ Машины имеют выкладочную головку с числовым программным управлением, установленную на коцне роботизированной руки (или системы поддержки порталного типа), чтобы автоматически распределять, прижимать, резать и переподавать несколько пучков или жгутов волокон на поверхность

оправки на высокой скорости. Пучки волокон могут быть предварительно пропитанны термореактивными или термопластичными материалами или даже из сухих волокон, которые потом могут быть пропитаны смолой. АВЛ машины укладывают армированный волокнами материал в форме ленты однонаправленного препрега или непрерывных полос ткани, а не отдельных жгутов, и также могут работать как с термореактивными, так и с термопластичными смолами. Основным различием между этими двумя системами является способность АВВ машины управлять жгутами волокон в пространстве по поверхности оправки, чтобы получать различные углы ориентации волокон и, следовательно, жесткостные свойства, такие как конфигураций, показанные на Рис. 5.

Эта возможность обусловлена способностью АВВ машин распределять жгуты волокон, которые являются небольшими по ширине, с разной скоростью, что не может быть выполнено на АВЛ машине.

Следовательно, АВВ машина может решить некоторые из потребностей по созданию деталей с более сложными особенностями, за счет сокращения общего количества материала, которое может быть распределено за единицу времени. С другой стороны, АВЛ машина может распределить в среднем больше материала на более однородных поверхностях без существенных особенностей с более высокой скоростью производства.

Считается, что введение автоматизированной техники в производстве композитных конструкций для нестандартных геометрий и локально усложненных форм является высокоэффективной технологией, которая может сломать ценовой барьер материала, который препятствует масштабному внедрению композитов в потребительские товары.

Машины АВВ и АВЛ, упомянутые выше, являются только образцами инструмента, которые однажды станут частью более сложной сборочной линии композитных конструкций с дополнительной автоматизированной техникой специального назначения, которые будут поставлять, размещать, и сочетать различные части сложной композитной конструкции, которые будут не только изготовлены из одного типа армированного волокном материала, но и будут состоять из систем гибридных материалов.

Не трудно представить, что нынешнее состояние композитных производственных операций может быть похожим на то, как автомобильные сборочные линии выглядели во время первых дней перехода от ручной сборочной линии к автоматизированным линиям с помощью всего лишь нескольких роботов. В конце концов, не так много людей могло бы догадаться, что конвейер автомобильного завода будет выглядеть так, как показано на рисунке 6 до перехода к автоматизированному производству. Поэтому вполне возможно,

что в следующем десятилетии или двух производство композитных конструкций и деталей будет полностью сделано в автоматическом режиме, начиная с армирующих волокон и систем смол, которые могут быть сформированы в желаемые микроструктуры в одном месте, где производится материал, деталь, и сборка, что заставляет производство выглядеть еще сложнее, чем в автомобильная сборочная линия, показанная на рисунке.



Рисунок 9: Автоматизированное роботизированное производство и сборочная линия для автомобильных приложений

Некоторые элементы этой тенденции уже в работах в научно-исследовательских лабораториях по всему миру. Например, 3D печать деталей получила весьма существенный импульс в течение последних трех-четырех лет.

2.5.2. Металлургия для авиационной и автомобильной промышленности, порошки для аддитивного производства

Мотивация – почему именно эта область важна для развития нового производства

Перспектива использования легких, преимущественно алюминиевых и титановых сплавов в авиационной и автомобильной промышленности обусловлена необходимостью снижения общего веса транспортного средства для повышения его топливной экономичности (снижение веса на 100 кг позволяет снизить расход топлива автотранспорта на 0,6 л/100 км). В настоящее время транспорт использует до 65% всего потребления нефтепродуктов, запасы которых исчерпаемы, а их потребление приводит к загрязнению окружающей среды. Кроме того, повышенное использование легких сплавов имеет другое практическое значение: более легкое транспортное средство имеет повышенную активную безопасность наряду с улучшенной управляемостью. Исследования, проведенные в 2003 году по заказу Dynamic Research Inc. показали, что снижение веса автотранспортного средства снижает фатальность в случае аварии, тогда

как уменьшение его размера напротив увеличивает эти риски. Таким образом, использование легких сплавов позволяет снизить вес при сохранении размера и функциональности транспортного средства. Еще одним преимуществом сплавов на основе алюминия и титана является то, что по завершении жизненного цикла их стоимость остается сопоставимой со стоимостью исходных материалов (более чем в 10 раз выше стоимости стального лома), а стоимость переработки, в частности, алюминия составляет всего около 6% от затрат на первоначальное производство. По данным Ассоциации алюминия (США) увеличение веса алюминиевых частей при производстве транспортных средств утраивается каждые 15 лет. На начало 2000-х годов доля алюминия, приходящегося на производство средств транспортировки, составляла более 30% от всего рынка алюминия. При этом данный сегмент рынка показывал наибольший рост (около 10% в год).

В 2013 году потребность авиакосмической отрасли в конструкционных материалах составляла 0,66 млн. т. В том числе, потребность в алюминиевых сплавах составляла – 48% от этого объема, титановых сплавах – 11%, композитных материалах – 4%. Основные мировые производители Boeing и Airbus вместе потребляют около 67% всего объема материалов для авиакосмической отрасли. Еще 7% потребляет GM. В денежном выражении рынок материалов для авиакосмической промышленности составляет около 10,9 млрд.\$, в том числе 27% выручки приходится на алюминиевые сплавы, 19% - композиты и 26% - титановые сплавы. В ближайшие 10 лет (с 2013 до 2023 гг) ожидается рост потребления в авиакосмической отрасли композитов CAGR – 5,9% (по массе), титановых сплавов – 4,4%, алюминиевых сплавов – 0,2%. Общий рост потребления материалов ожидается на уровне 1,1% при общем росте продаж авиационной промышленности 2,3% со 162 млрд \$ в 2013 до 200 млрд. \$ в 2023 году.

Благодаря высокой удельной прочности (в несколько раз выше стали) и коррозионной стойкости титановые сплавы приходят на смену широко используемым в настоящее время конструкционным материалам. Кроме того, титановые сплавы применяются там, где алюминиевые сплавы не удовлетворяют требованиям по прочности, коррозионной стойкости (в том числе при контакте с композитами) и рабочим температурам. Так если в лайнере Boeing 737 было только 2% титановых сплавов от общего веса, то в лайнере 787 (Dreamliner) уже 17%. Еще большее повышение удельной прочности (прочность на единицу плотности) достигается при формировании в титановых сплавах ультрамелкозернистой структуры, в частности с использованием методов интенсивной пластической деформации. В результате этого, удельная прочность титановых сплавов

может быть повышена еще примерно на 30%. Полученные методами интенсивной пластической деформации титановые и алюминиевые сплавы, помимо повышенных эксплуатационных (прочностных) характеристик, обладают также высокими технологическими, в частности сверхпластичными свойствами, с относительным удлинением до разрушения более 1000%. Это позволяет получать полуфабрикаты и изделия из таких материалов в режиме сверхпластической формовки.

Основным драйвером роста потребления легких материалов в авиакосмической промышленности, наряду со снижением веса является необходимость повышения скорости (особенно в случае военной авиации) самолетов. По оценкам специалистов, для достижения скорости в несколько раз превышающей скорость звука массовая доля титана и его сплавов в самолетах должна вырасти на 60-90%. Особое значение при разработке самолета имеют конструкционные материалы, влияние веса которых на характеристики изделия в целом носит кумулятивный характер (снижение веса конструкции на 1 кг приводит к снижению веса на 1 кг деталей в других частях самолета). Это в свою очередь приводит к снижению общего расхода топлива и нелинейному экономическому и экологическому эффекту. Примером этого может служить уменьшение веса конструкций фюзеляжа, что приводит к снижению размера и веса крыльев и, как следствие, самолета в целом.

В настоящее время большинство известных в мире авиа- и автопроизводителей развивает производство из легких сплавов на основе широко используемых технологий обработки давлением (прокатка, штамповка, экструзия и т.п.). Вместе с тем, в последние годы разрабатываются принципиально новые ресурсосберегающие аддитивные технологии и роботизированные системы, позволяющие получать детали сложной формы из легких сплавов, в частности методом прямого лазерного синтеза (лазерной наплавки) с использованием 3D моделирования. В этом случае имеется возможность формирования многоуровневых (многокомпонентных) структур, обеспечивающих требуемые прочностные свойства и надежность конструкций. Использование таких технологий позволяет значительно (в некоторых случаях на порядок) снизить расход материала и стоимость готового изделия.

Отдельным направлением в развитии аддитивных технологий является разработка методов получения сверхчистых по примесям внедрения и керамическим включениям ультрадисперсных порошков на основе титановых, алюминиевых и никелевых сплавов, в частности атомизации расплава, для селективного лазерного спекания. Общим

требованием к порошкам для АМ-машин является сферическая форма частиц. Это связано, во-первых, с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем. И, во-вторых, необходимо обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением, что как раз достигается при сферической форме частиц. Существующие методы получения металлопорошков могут быть условно разделены на физико-химические и механические.

К физико-химическим относят технологии, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья. При этом химический состав и структура конечного продукта – порошка, существенно отличается от исходного материала. Механические методы обеспечивают производство порошка из сырья без существенного изменения химического состава. К механическим методам относятся, например, многочисленные варианты размол в мельницах, а также диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости. Этот процесс как раз и называют атомизацией. Частицы порошков, получаемых механическими методами путем размол, имеют осколочную, неправильную форму. В изготовленном порошке содержится относительно большое количество примесей – продуктов износа размольных тел и футеровки мельницы. Поэтому эти методы не применяют для получения порошков, используемых в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава – наиболее производительный, экономичный и эффективный способ получения мелких и средних порошков металлов. 60-70% объема всех промышленных порошков получают именно этим методом. Распыление (атомизацию) широко применяют при производстве порошков многокомпонентных сплавов, в частности, с аморфной структурой, которая позволяет достичь равномерного химического состава композиции, даже при содержании легирующих компонентов выше их предела растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные с использованием методов диспергирования расплавов, имеют форму частиц, близкую к сферической. Вследствие этого, более 90% всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава.

Основными технологиями получения порошков для АМ-машин являются: газовая атомизация; вакуумная атомизация; центробежная атомизация.

Газовая атомизация. Согласно этой технологии металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или инертной среде) и затем сливают в управляемом режиме

через специальное устройство – распылитель, где производится разрушение потока жидкого металла струей инертного газа под давлением. Для получения мелких порошков $d=10\text{--}40$ мкм, наиболее часто применяемых в аддитивных технологиях, используют так называемые VIM-атомайзеры (Vacuum Induction Melting), в которых плавильную камеру вакуумируют для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом.

Вакуумная атомизация. Процесс вакуумной атомизации в зарубежной литературе часто

называют soluble gas atomization, т. е атомизация за счет растворенного в расплаве

газа. Суть его состоит в следующем. Атомайзер состоит из двух камер – плавильной и распылительной. В плавильной камере создают избыточное давление газа (водород, гелий, азот), который растворяется в расплаве. Во время атомизации металл, под действием давления в плавильной камере поступает вверх к сопловому аппарату, выходящему в распылительную камеру, где создают вакуум. Возникающий перепад давлений побуждает растворенный газ к выходу на поверхность капель расплава и «взрывает» капли изнутри, обеспечивая при этом сферическую форму и мелкодисперсную структуру порошка.

Технологии центробежной атомизации весьма разнообразны, но наибольший интерес представляют те, которые позволяют получать порошки наиболее ценных для аддитивных технологий сплавов – реактивных и тугоплавких металлов. Технология REP – Rotating Electrode Process предполагает распыливание расплава, создаваемого электрической дугой между прутком материала (обычно $\varnothing 15\text{--}75$ мм) и вольфрамовым электродом. Главным достоинством этого метода является полное исключение контакта расплава с тиглем, разливочными устройствами, что имеет место, например в технологии VIM или при центробежном распылении на вращающемся диске. Частицы порошка титанового сплава Ti6Al4V, полученного этим методом отличаются правильной сферической формой, без «сателлитов» - пылевидных частиц, налипающих на более крупные в результате соударения в процессе газовой атомизации.

В связи с неразвитостью российского рынка (менее 1,5% от общемирового), металлопорошковые композиции для аддитивных машин в основном приходится также закупать за рубежом. Оптовая цена таких порошковых материалов на внешнем рынке примерно такова: чистый титан - €230/кг, сплав Ti-6Al-4V - €200/кг, сплав Co-Cr - €150/кг, сплавы Al - €70-90/кг, Inconel 625 - €75/кг. Однако, российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, а как правило втрое дороже. Таким образом, в целях развития импортозамещающих перспективных технологий для авиационной и

автомобильной промышленности в России необходимо налаживать собственное производство установок для аддитивных технологий, наряду с развитием методов атомизации для получения сырья (порошков) с необходимыми характеристиками.

К числу перспективных в настоящее время для авиационной и автомобильной промышленности, помимо вышеуказанных, можно также отнести новые технологии сварки, в том числе в твердой фазе (сварка трением), обеспечивающие высокие характеристики соединений иногда из несвариваемых обычными способами материалов. Необходимо отметить, что если традиционные технологии получения и обработки легких сплавов давлением для авиационной и автомобильной промышленности в России развиты достаточно хорошо, то новые указанные выше направления практически отсутствуют. В связи с этим, развитие аддитивных технологий представляется весьма перспективным, поскольку это направление имеет ряд отмеченных выше преимуществ, не требует больших капиталовложений и может быстро стать конкурентоспособным.

Какие смежные сферы она затрагивает, какие условия важны для ее развития

Развитие указанных выше аддитивных технологий невозможно без соответствующего металлургического производства (в том числе порошкового) легких сплавов, машиностроения (лазерные устройства для получения деталей методами аддитивных технологий и др.), а также поступательного динамичного развития авиационной и автомобильной промышленности в целом, основанного на разработке новых типов самолетов и моделей автомобилей с большим удельным весом легких сплавов. Развитие аддитивных технологий, помимо создания новых устройств, требует также разработки новых технологий получения исходных материалов на основе легких сплавов (прежде всего порошковых), а также развития инновационных подходов в 3D моделировании.

Текущие и прогнозные возможности данной области

Как уже отмечалось выше, в настоящее время в России практически отсутствуют аддитивные технологии обработки легких сплавов, особенно в автомобилестроении. Вместе с тем, учитывая мировой тренд на увеличение доли легких сплавов при производстве современных транспортных средств в сочетании с ресурсосбережением, можно с уверенностью прогнозировать повышенный рост спроса на легкие сплавы в авиационной и автомобильной промышленности, получаемые с использованием данной технологии в ближайшем будущем.

Параметры спроса: что и кому дает развитие этой области, на какие индустрии и/или их подотрасли влияет.

Развитие указанных производств полуфабрикатов и изделий из легких сплавов для авиационной и автомобильной промышленности позволит создать новые высокотехнологичные рабочие места, обеспечит указанные отрасли промышленности импортозамещающей продукцией, повысит конкурентоспособность отечественной авиационной и автомобильной техники.

Роли заинтересованных сторон:

— Промышленность – потребители ППТ. Предприятия авиационной и автомобильной промышленности получают возможность развивать собственное импортозамещающее производство деталей и конструкций из легких сплавов.

— Промышленность – поставщики ППТ. Крупнейшие в мире российские металлургические предприятия цветной металлургии (прежде всего РУСАЛ и ВСМПО-АВИСМА) получают дополнительные рынки сбыта своей продукции.

— Академия. Академические институты в консорциуме с Вузами и отраслевыми центрами должны будут осуществлять разработку требуемых технологических решений и подготовку высококвалифицированных кадров.

— Вузы. Должны разрабатывать и внедрять новые программы подготовки кадров, требуемых для организации такого рода производств. На основе имеющихся высокопроизводительных компьютерных кластеров могут генерировать новые подходы к 3D моделированию.

— Государство. Должно осуществлять заказ на разработку необходимых промышленных технологий через систему определения основных приоритетов развития страны (критические технологии, технологические платформы и т.п.)

Относительные масштабы влияния на такие параметры, как:

- Ускорение инноваций
- Повышение конкурентоспособности промышленности
- Сокращение сроков разработки новой продукции
- Снижение себестоимости
- Другие эффекты

Проведение вариантных исследований, быстрое изготовление опытных образцов позволяет на порядок (а иногда и больше) сократить время проведения НИОКР и, как следствие, значительно сократить сроки выхода новой продукции на рынок.

Оценки для России (прогнозные)

Несмотря на имеющееся отставание от стран Запада, Россия, при соответствующих инвестициях еще имеет возможность наладить собственное конкурентоспособное производство, перспективное для стратегических отраслей промышленности.

Барьеры развития – научные и технологические

Отсутствие в настоящее время высококвалифицированных кадров, а также собственного производства систем для аддитивных технологий и методов получения порошковых материалов с необходимыми характеристиками.

Выводы:

— Необходимо на основе хорошо развитого в России металлургического производства осваивать новые перспективные технологии обработки легких сплавов и получения полуфабрикатов и изделий для авиационной и автомобильной промышленности. В этой связи наиболее перспективным представляется развитие аддитивных технологий, поскольку это направление имеет ряд преимуществ, не требует больших капиталовложений и может быстро стать конкурентоспособным. Кроме того, целесообразно разрабатывать новые технологии сварки и утилизации (переработки) элементов машин и конструкций из легких сплавов по завершению их жизненного цикла.

2.5.3 Материалы для средств автономного питания и накопления электроэнергии

Мотивация – почему именно эта область важна для развития нового производства

Источники электрической энергии необходимы для обеспечения функционирования широкого класса существующих и разрабатываемых потребительских товаров, транспорта, изделий машиностроения и производственного оборудования.

Собственно приоритеты развития средств автономного питания и накопления электроэнергии (батарей) определяются следующими факторами:

- развитостью технологий преобразования электрической энергии в другие виды энергии, передачи электрической энергии практически на любые расстояния с приемлемым уровнем потерь при передаче и преобразовании электрической энергии
- возрастающим трендом мобильности и автономности аппаратуры и устройств, использующих при функционировании электрическую энергию и соответственно

возрастанием требований к мощности и ресурсу накопителей, обусловленным техническим прогрессом в этих областях

- необходимостью снижения расходов невозобновляемого топлива в связи с исчерпанием их запасов, перехода на возобновляемые источники энергии (энергетика солнечная, ветряная, приливная, гидротермальная и др.) и соответственно средств накопления и переноса этой энергии
- возрастающей экологической нагрузкой, вызванной использованием на транспорте и машиностроении тепловой энергии вырабатываемой при сжигании топлив и ужесточение соответствующих экологических требований (при эксплуатации электромобилей, например, отсутствуют выбросы вредных отработанных газов)

Главными технико-экономическими показателями батарей, которые определяют их конкурентоспособность, являются удельная мощность, емкость, безопасность, в т.ч. экологическая и себестоимость. Эти характеристики взаимосвязаны - повышение емкости, как правило, уменьшает ток нагрузки, оптимизация текущей нагрузки снижает удельную энергию, упрочнение ячейки для увеличения срока службы и безопасности приводит к увеличению размера батареи и её стоимости за счет более широкого слоя сепаратора.

К самым перспективным электрохимическим аккумуляторам сегодня относят литиевые. Литий имеет громадный электрохимический потенциал по отношению к собственному весу по сравнению с другими металлами. В то же время, при циклических зарядах-разрядах металл катода прорастает через сепаратор, что ведет к внутреннему короткому замыканию, повышению температуры вплоть до плавления лития. Для решения данной проблемы применяют неметаллические материалы, содержащие ионы лития. По сравнению с металлическим литием это снижает емкость, но повышает безопасность батареи. В то же время работы по стабилизации металлического лития в аккумуляторах продолжаются. В качестве анода Li-ion батарей применяют графит. Перспективными для разработки анодов новых батарей являются углеродные материалы, например, углеродные трубки, кремниевые и титановые сплавы.

На долю катодов приходится до 39% себестоимости сырьевых материалов для производства батарей, еще 18% приходится на материалы анода, 13% - электролит, 19% - сепаратор, 11% - остальные материалы. В целом себестоимость ячейки батареи 96 Вт*ч (для гибридных авто) составляет \$23,3 (243 \$/кВт*ч). В структуре себестоимости такой

батареи около 58% составляют материалы (при этом норма прибыли при производстве батареи составляет – 5%, накладные – 1%, трудозатраты – 6%).

Для изготовления катодов литий-ионных аккумуляторов используют следующие материалы: LCO (литий - оксид кобальта), LMO (литий - оксид марганца), LFP (литий - фосфат железа), NCM (литий – никель- марганец – кобальт) и NCA (литий - никель = кобальт - оксид алюминия). Все эти материалы обладают теоретически одинаковыми свойствами в заданных пределах. Согласно прогнозам на 2013 год, рынок катодов для батарей вырастет с 110,9 в 2015 г до 220,9 тыс.т. в 2020 г. Основные драйверы роста – мобильные электронные устройства (телефоны, планшеты, ноутбуки), системы хранения энергии и транспортные средства. На NCM катоды в 2015 г будет приходиться 42,9 тыс.т. продаж, к 2020 г. этот объем вырастет до 78,1 тыс.т. LMO катоды - с 18 до 36,3 тыс.т. Наиболее бурный рост ожидается на катоды по технологии LFP – с 9,2 до 40,9 тыс.т. Продажи катодов LCO составят в 2015 г – 32,9 тыс.т., в 2020 – 52,9 тыс.т. Менее всего увеличится потребление NCA катодов – до 12,8 тыс т. в 2020 с 7,9 тыс т в 2015 году.

В 2012 году компания BASF инвестировала \$50 млн в приобретение компании Sion Power (Tucson, Arizona) – лидера в разработке литий-серных (Li-S) батарей (более чем 100 патентов США и международных патентов). Катоды для этих аккумуляторов начали выпускать на заводе Elyria (Ohio) в 2013 г. Годовой бюджет BASF на поиск, разработку и производство материалов для батарей для электромобилей в 2013г. составил 1,7 миллиарда Евро. Более того, компания BASF объявила о намерении инвестировать 3-значную сумму в миллионах Евро в разработку и производство новых материалов для батарей до 2016 года. Для развития рынка электромобилей и «батарейной» промышленности, правительство США предоставило гранты на общую сумму в \$2,4 млрд.

Таким образом, безусловно рынок материалов для батарей является быстрорастущим и определяющим развитие таких отраслей как автомобилестроение и электроника. Производство материалов для батарей является высокотехнологичным, наукоемким. Прикладные исследования в области материалов для батарей перспективны для дальнейшего развития (далеко не исчерпаны потенциал).

Какие смежные сферы она затрагивает, какие условия важны для ее развития

Развитие автомобильной промышленности и электроники необходимо для обеспечения спроса на батареи и соответственно материалы для их производства.

Дополнительным (стимулирующим) фактором развития спроса является ужесточение экологических требований к автотранспорту и содержанию токсичных компонент в бытовой электронике.

Развитие технологии аддитивного производства обеспечит создание нового поколения батарей в широком диапазоне характеристик удельной мощности и емкости.

Развитие производства порошков металлов и соединений, в том числе наноразмерных и композиционных, необходимо для сырьевого обеспечения производства материалов для современных и перспективных батарей.

Для обеспечения механо-химических процессов, лежащих в основе процессов получения перспективных материалов для батарей необходимо автоматизированное оборудование применяемое в химической промышленности и порошковой металлургии (смесители, гомогенизаторы, экструдеры, термическое оборудование).

Текущие и прогнозные возможности данной области

Для рынка портативной электроники главным требованием к батарее является минимальный размер, при этом критическими являются характеристики - удельная объемная ёмкость ($A \cdot \text{ч/л}$) и энергия ($\text{Вт} \cdot \text{ч/л}$). Для автомобильной промышленности основным требованием является минимальный вес батарей, при этом критическими являются такие характеристики как емкость ($A \cdot \text{ч/г}$), мощность (Вт/г), энергия ($\text{Вт} \cdot \text{ч/г}$), долговечность и надежность при снижении стоимости ($\$/\text{Вт} \cdot \text{ч}$).

Предел теоретической емкости Li-ion технологии равен приблизительно $2000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, что более чем в 10 раз превосходит емкость реально существующих Li-ion батарей. В настоящее время удельная емкость литиевых батарей составляет $140\text{-}190 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ (LCO, NMC) и $90\text{-}135 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ (LMO, LFP), число циклов заряда/разряда составляет $500\text{-}1000$ (LCO и LMO) и $1000\text{-}2000$ (NMC, LFP). Батареи типа LFP считаются наиболее безопасными в эксплуатации.

Прогноз ёмкости батареи с анодами $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ (для ноутбуков и телефонов) на ближайшие 10-12 лет дает увеличение удельной энергии на 20-30 %, уменьшение на ~30-50% размеров, главным образом, за счет увеличения ёмкости анодов. Разработка более дешевых катодов позволит снизить общую стоимость батарей для транспортных систем на ~50%, по сравнению с аналогичными для портативных устройств. Ожидается, что наноструктурный инжиниринг позволит увеличить долговечность при работе на

мощности в 10 или даже 100 раз превышающей современную. Жестким и еще невыполненным требованием к перспективным аккумуляторам для автомобилей является 10-15 кратное увеличение срока их службы (до ~5000 циклов).

В настоящее время идет бум развития разнообразных решений для анодов литий-ионных батарей. Аноды должны обладать высокой электронной и ионной проводимостью (высокая скорость процесса внедрения /извлечения лития), низким напряжением с тестовым электродом (Li), большой удельной ёмкостью, высокой устойчивостью структуры при внедрении и извлечении лития. Возможные пути улучшения характеристик анодов связаны с модификацией структуры анода, уменьшением пористости, применением новых (композиционных) материалов, модификацией свойств пограничной с электролитом поверхности.

Основным материалов анодов - носителей ионов лития современных литиевых батарей является графит. Структура графита способна принять максимум 1 атом Li на 6 углерода, что дает максимально достижимую емкость на уровне 372 mAh/g. К настоящему времени емкость графитового анода достигла 360 mAh/g, что фактически означает достижение теоретического максимума. Для производства углеродных анодов применяют специальное связующее SBR (Styrene - Butadiene – Rubber – компания BASF), которое должно обеспечивать высокую адгезию и стабильность дисперсии. Основным полем для совершенствования материала анода является повышение мощности, т.е. скорости разряда/заряда батареи. Задача увеличения мощности является одновременно задачей увеличения долговечности, так как быстрая разрядка/зарядка анода приводит к разрушению структуры графита, "протягиваемыми" через него ионами лития. Первый вариант повышения мощности состоит в увеличении соотношения поверхность/объем, второй – организация диффузии лития вдоль определенных направлений кристаллической решетки графита (скорость диффузии лития вдоль разных направлений графита отличается на 10 порядков).

Одним из самых многообещающих направлений является разработка анодов из элементов 14-й группы периодической таблицы. Олово, кремний, германий образуют растворы типа внедрения с литием. При этом возникают существенные объемные деформации материала при насыщении литием (при зарядке) – до 400%, соответственно теряется емкость из-за потери контакта с токоснимателем. Максимальная теоретическая ёмкость анода из олова 960 mAh/g. Наиболее перспективными считаются аноды на основе

кремния с теоретической емкостью 4200 мА*ч/г, при этом перспективные по массогабаритным характеристикам. Эти материалы сегодня уже применяются в комбинированных с графитом анодах, поднимая их характеристики на 20-30%. Перспективным решением является применение порошковых материалов (в том числе наноразмерных). Это позволяет избежать деформаций при насыщении порошка литием. Например, емкость структуры из порошинки оловянного ядра с оболочкой из меди составляет порядка 800 мА*ч/г. Наноструктуры на основе нановолокон Si покрытых пленками графита обеспечивают емкость 3400 мА*ч/г со снижением до 2750 мА*ч/г после 200 циклов. Перспективны исследования с наноразмерными структурами в форме пластин, трубок, стержней, сфер. В качестве носителя кремниевых, например, материалов может служить изобретенный Berkley Lab. гель, предотвращающий слипание наночастиц и в то же время являющийся электронно-проводящим.

Также перспективными материалами для анода являются оксиды металлов, например, железа, которые также обладают высокой ёмкостью по отношению к литию. Если в графите литий находится между слоями графена, в кремнии образуется соединение по принципу внедрения в кристаллическую решетку, то в оксидах литий образует связь с кислородом, разрывая последнюю от металла. Реализация такой обменной реакции требует также дисперсной структуры носителя для обеспечения свободного перемещения ионов лития.

Исследователи Стэнфордского университета предложили создать анод из микрочастиц кремния, поместив их в углеродную оболочку большего размера в сравнении с самой частицей, таким образом предоставив кремнию пространство для расширения, происходящее во время зарядки. Используя специальную микроэмульсию, микрочастицы с оболочкой собраны в группы и помещены в еще одну, более толстую «скорлупу» из углерода. В результате получилась структура, напоминающая гранат. Каждая батарея содержит множество таких «гранатов». Такая структура обеспечивает свободное протекание электрического тока, обладает более длинным по сравнению с предыдущими аналогичными проектами жизненным циклом, сохраняя 97% емкости спустя 1 тыс. циклов перезарядки.

Материалы для катода разрабатывают по формуле LiMO_2 , где $\text{M}=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}, \dots \text{Fe}$. Глобальная проблема – увеличение емкости катода выше достигнутых сегодня 190 мАч/г (никель) или 160-170 мАч/г (кобальт). Оливин LiFePO_4 – обеспечивает 170 мАч/г, но обладает плохой проводимостью. Измельчение, покрытие графитом, легирование ниобием

и другими веществами позволило уже увеличить проводимость на 8 порядков. Фактически дальнейшее совершенствование оливина (например, замена сульфатов флюорофосфатами и др.) позволит оливину занять ведущие позиции в числе материалов для катодов.

Экспериментальные исследования, выполненные инженерами Гарварда и Иллинойского университета в Урбане-Шампейне, показали возможности изготовления литий-ионных аккумуляторов толщиной менее 1 миллиметра. Катоды из литированного фосфата железа $\text{LiFePO}_4(\text{LFP})$ и аноды из титаната лития $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}(\text{LTO})$ напечатаны слоями на 3D-принтере. Для этого использованы наночастицы LFP и LTO диспергированные в вязкий раствор. Миллиметровые аккумуляторы найдут применение в миниатюрной электронике, MEMS-устройствах. Изготовление электродов методом 3D-печати позволяет повысить удельную мощность и энергоплотность нанобатарей.

Материалы для батарей являются перспективным объектом применения самых последних достижений и разработок в области материаловедения и нанотехнологий, аддитивных технологий, инженерии поверхности, синтеза композиционных материалов и управления их структурными и функциональными свойствами.

Параметры спроса: что и кому дает развитие этой области, на какие индустрии и/или их подотрасли влияет

Рынок Li-ионных батарей составляет (по данным 2011 г) около 4,5 млрд. ячеек (9,3 млрд \$ в денежном выражении). По оценкам президента Kureha Corp., к 2020 рынок может вырасти до \$65-100 млрд (в основном за счет роста рынка электромобилей, с финальной сегментацией рынка автомобили/электроника как 60/40). Основные производители – Panasonic Sanyo (23% продаж), Samsung SDI (21%), LG (17%), Sony (13%). По области применения около 3, млрд приходится на рынок сотовых телефонов, 2,6 млрд – ноутбуки и остальное – другие приложения.

Перспективным является рынок батарей для автомобилей (электромобилей и гибридных). Мощность батарей для транспорта варьируется от 40 до 120 кВт, ресурс – от 0,5 до 100 кВт*ч. Продажи в этом сегменте практически исключительно для пассажирского транспорта (75,8 млн легковых транспортных средств в 2011 с ростом до 89,2 млн. автомобилей в 2020, по сравнению с грузовиками – от 2 до 3,4 млн шт.). Собственно рост рынка пассажирских автомобилей с интегрированным генератором

ождается с 2% в 2011 (1,5 млн) до 9% (8 млн) в 2020, грузовых – до 3% (136 тыс.). Полных гибридов и полностью электрических машин – до 1-2% (2-3 млн.) в 2020г. Основной драйвер – ужесточение экологических стандартов. При этом потребность в электроэнергии вырастет более чем на порядок – для легковых авто от 3 (2011 г) до 45 ГВт*ч (2020), в том числе 15 ГВт*ч – на электромобили, 23 ГВт*ч – гибридные (возможность перемещения только на электроэнергии) и 7ГВт*ч – на автомобили с интегрированным генератором. Создание относительно легкой и достаточно емкой батареи может резко изменить отношение покупателя к электромобилю как к удобному, экономичному и экологически чистому виду транспорта.

Литиевые батареи также перспективны для применения в системах хранения энергии (источники возобновляемой энергии). Ожидается рост этого рынка с 0,1 ГВт в 2011 г. до 10,9 ГВт в 2020 г., в том числе на долю литиевых батарей придется до 2,6 ГВт в 2020 г.

Основные разработчики батарей - компании BASF и Evonic Industries (Германия). В 2013 году BASF заявил о новых безопасных батареях большой мощности, позволяющих увеличить автономию электромобилей. Это может помочь довести емкость рынка электромобилей до \$20 млрд. к 2020 году. Потребность в Li батареях для таких приложений как мобильные телефоны и ноутбуки растет более чем 10% в год. Развитие таких областей как гибридные автомобили и легкие электрические машины будет дополнительно стимулировать рынок батарей и соответственно развитие производства материалов определяющих эффективность, стоимость и безопасность батарей.

Роли заинтересованных сторон:

- Промышленность – потребители ППТ. В материалах для батарей заинтересованы все крупнейшие зарубежные производители батарей. Такие компании как GE, BASF, Evonic заинтересованы в технологиях получения материалов для батарей. В России заинтересованными предприятиями являются производители аккумуляторов, в том числе созданная Роснано компания Liotech.
- Промышленность – поставщики ППТ. Компании – производители технологического оборудования химической промышленности, порошковой металлургии. В России – небольшие предприятия, разрабатывающие и изготавливающие оборудование для производства порошковых материалов.
- Академия. Фундаментальные и прикладные исследования в области способов получения наноразмерных порошков, трубок и других наноразмерных структур для создания нового поколения материалов для анодов и катодов, инженерии поверхности контактных элементов батарей, синтеза композиционных материалов

для получения катодов и анодов с улучшенными характеристиками. Совместно с предприятиями отрасли разработка технологий производства материалов для батарей.

- Вузы. Подготовка технологов и инженерного персонала для обеспечения производства, а также исследований в данной области. Проведение исследований совместно с академическими учреждениями.
- Государство. Финансовая поддержка исследований в предметной области (в рамках федеральных программ). Инвестиции в развитие производственной инфраструктуры. Стимулирование спроса на продукцию ужесточением регулирующих требований в области экологии, развитием производств-потребителей продукции.

Относительные масштабы влияния на такие параметры, как:

- Ускорение инноваций. Улучшение технико-экономических характеристик батарей, которое произойдет ближайшие 5 лет, приведет к существенному изменению спроса на продукцию автомобильной и ряда других отраслей, поскольку обеспечит огромное число приложений мощными, емкими, компактными источниками энергии. В мировом масштабе это обеспечит 2-кратное увеличение производства материалов для батарей в 5-летний срок главным образом - из-за роста спроса на инновационную продукцию.
- Повышение конкурентоспособности промышленности. Создание новых производств в области материалов для батарей определяет более чем на 90% долгосрочное будущее (конкурентоспособность) автомобилестроения и ряда других видов транспорта и вооружений.
- Сокращение сроков разработки новой продукции. Создание производства материалов для батарей обеспечит конструкторов и инженеров техническими решениями в области автономного энергообеспечения, что будет способствовать сокращению сроков разработки новой продукции.
- Снижение себестоимости. Создание новых производств материалов для батарей окажет влияние на снижение себестоимости транспортировки.
- Другие эффекты. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

Оценки для России (прогнозные)

Наиболее дорогие аккумуляторы поставляются в Россию из США, Франции и Германии, при этом доля этих стран в натуральном выражении незначительна. В январе-октябре 2013 г. более 80% аккумуляторов в натуральном выражении поставляется в

Россию из Китая. Российского промышленного производства современных литий-ионных аккумуляторов на данный момент нет. Такие компании как «АК Ригель» и ОАО «Энергия» например производят литий-ионные аккумуляторы в основном для нужд ВПК и по заказам. В конце 2009 года было принято решение об участии РОСНАНО в проекте по созданию первого в России производства современных литий-ионных батарей. Запуск производства Лиотех произведен в третьем квартале 2011 г. Плановая проектная мощность производства - 400 млн. А*ч в год. Крупнейшим покупателем пока считается российский производитель электрических тракторов и других транспортных средств, компания Mobil (контракт на 3 млрд руб). Но в будущем предполагается большой спрос на аккумуляторы от китайских компаний. Общая мощность завода позволяет выпускать примерно один миллион аккумуляторов в год, которыми предполагается оснащаться в первую очередь электрические автобусы и микроавтобусы. 1 млн аккумуляторов в год хватит примерно на 5000 автобусов. В 2012 году по сравнению с 2011 годом объем импорта литий-ионных аккумуляторов в Россию вырос на 29,3% в денежном выражении и на 7,1% в натуральном. В январе-октябре 2013 года было импортировано 4,1 млн. литий-ионных аккумуляторов на 35,2 млн. долл., что по сравнению с аналогичным периодом 2012 г. на 7,8% меньше в денежном выражении и на 22,4% - в натуральном. Объем экспорта незначителен и в основном это реэкспорт. Большая часть литий-ионных аккумуляторов, поставляемых в Россию, предназначена для сотовых телефонов (в январе-октябре 2013 г. - около 56% от всего импорта в натуральном выражении и 14% – в стоимостном).

Общий объем продаж автомобильных аккумуляторов в РФ колеблется в районе показателя 15 миллионов шт. и, как прогнозируют специалисты, будет продолжать расти в течение, как минимум, еще пяти лет. В 2011 году российские аккумуляторные заводы («Курский аккумулятор», «ИСТОК», «Пилот», «Электроисточник», «Selenius», «Atom» (ПАЗ), Tuymen Battery, «Лидер», «Подольские аккумуляторы» и др.) произвели примерно 6,5 миллионов единиц продукции. На рынке РФ последние годы снизилась доля продукции отечественных производителей и доля их продукции, идущей на экспорт. Наибольший рост притока импорта аккумуляторных батарей приходится на продукцию сербских (SOMBOR) и украинских (WESTA) заводов. Сегодня импортные батареи составляют $\frac{3}{4}$ рынка, в то время как еще в 2009 году почти 60% общего объема продаж занимала продукция российского производства. Производимые в России на 2013 год батареи (НПО ССК, АК Ригель, НИИХИТ-2, ОАО «НИАИ «Источник», ОАО Энергия) существенно уступают по характеристикам зарубежной продукции. Создание

производства материалов для современных литий-ионных батарей обеспечит восстановление доли автомобильных аккумуляторов отечественного производства на рынке. При условии положительной динамики развития рынка транспортных средств в России, объемы продаж на рынке аккумуляторов составят около \$1 млрд.

Сегодня основными мировыми поставщиками лития являются Чили и Боливия. Технология добычи лития в этих странах основана на открытой добыче соли с высохших соляных озер, из которой затем выделяют карбонат лития, а из него уже получается металлический литий и другие его соли. В России сосредоточены одни из крупнейших в мире запасы лития. Их разработка в России дороже, но при определенном мировом уровне цен на литий освоение этих месторождений рентабельно (пегматиты на Алтае и в Красноярском крае, минерал сподумен - силикат лития и алюминия). Так, в одном из крупнейших в мире Колмозерском месторождении сподуменовых пегматитов сосредоточено 48% активных запасов литиевых руд России. На базе этого месторождения возможна организация открытой добычи редкометалльных руд с годовой производительностью карьера до 750 тыс. т., что обеспечит выпуск до 100 тыс. т керамического сподумена, 2 тыс. т карбоната лития, до 70 т пентафторидов тантала и ниобия. Одним из источников сырья для производства лития являются соляные растворы при добыче нефти (побочные отходы).

Барьеры развития – научные и технологические

Компания BASF является единственным владельцем лицензии на LFP (Lithium Iron Phosphate) технологию, разработанную Argonne National Laboratories, и одним из 2-х владельцев лицензии той же лаборатории на NCM материалы катода.

Главным вопросом во внедрении новых батарей является их безопасность, т.е. репутация фирмы. В настоящее время на рынке идет борьба крупных компаний Sony, Panasonic, Sanyo, Samsung, 123systems и др., поэтому развитие новых компаний считается маловероятным событием.

Выводы:

С учетом наличия в России материаловедческих центров, выполняющих исследования разработки в области порошковых материалов, нанотехнологий обработки и модификации поверхности материалов, синтеза композиционных материалов, а также наличие сырьевой базы необходимо создание интегрированной научно-производственной структуры, ориентированной на исследования в области материалов для батарей, разработки и выпуска

экспериментальных и серийных партий литий-ионных батарей. Синергетический эффект может быть достигнут за счет интеграции с аддитивными технологиями производства батарей. Развитие данного направления имеет стратегическое значение как для России, так и всего мира с учетом определяющего значения материалов для создания энергоносителей (химических накопителей и источников тока) и их определяющего (долгосрочного) влияния на развитие транспортной отрасли, возобновляемой энергетики, наличия внутреннего рынка потребления, а также наличия кадровых и сырьевых ресурсов, научно-технологического задела в направлениях приоритетного развития.

2.5.4 Высокоэнергетические материалы

Мотивация – почему именно эта область важна для развития нового производства

Высокоэнергетические материалы – пороха, твердые ракетные топлива, взрывчатые вещества – чрезвычайно компактные носители энергии, прежде всего, применяемые в ракетной технике, боеприпасах, при производстве взрывных работ в строительстве, горнодобывающей промышленности и т.п. Эта область важна для создания новых вооружений.

Какие смежные сферы она затрагивает, какие условия важны для ее развития

Геофизическая разведка, газогенераторы повышения нефтеотдачи пластов, твердотопливные МГД и ЭМ генераторы, газогенераторы для аварийных систем, вытеснительных систем в пожаротушении, систем наддува, подъема затонувших объектов; автомобильные подушки безопасности, ударно-волновое компактирование, материаловедение (получение сверхтвердых материалов, композитов).

Текущие и прогнозные возможности данной области

- Синтез новых материалов. Еще в СССР синтезированы гидрид алюминия (горючее высокоэнергетических материалов), динитрамид аммония (окислитель), создано промышленное производство этих веществ. До настоящего времени на Западе гидрид алюминия для применения в высокоэнергетических материалах не получен даже в лабораторных масштабах. В шведской компании FOI и голландской TNO синтезируют динитрамид аммония (АДНА). Но он по качеству хуже, чем в России, а объемы производства неизмеримо меньше. Перспективным высокоэнергетическим материалом является гексаазоизовюрцитан (CL-20), где Россия также занимает лидерские позиции. В настоящее время это наиболее мощное взрывчатое вещество из

известных. Сырьем для CL-20 является глиоксаль, промышленное производство которого реализовано в Томской области (единственное в России).

- Применение высокоэнергетических материалов – это новые технологии повышения нефтеотдачи, материаловедения и т.д.
- Разработка высокоэнергетических систем – гиперзвуковые ракетные двигатели, гибридные ракетные двигатели, газогенераторы «холодного» газа.

Параметры спроса: что и кому дает развитие этой области, на какие индустрии и/или их подотрасли влияет.

Нефте – газодобывающая промышленность, автомобильная промышленность, МЧС, строительство, вооружение и военная техника, материаловедение.

Роли заинтересованных сторон:

- Промышленность – потребители ППТ. Создание новой конкурентоспособной продукции.
- Промышленность – поставщики ППТ. ФЦДТ «Союз», ФНПЦ «Алтай», ЦНИИХМ, ГНИИХТЭОС, предприятия отрасли боеприпасов.
- Академия. Ведущие исследовательские организации РФ: ИПХЭТ, ИОХ СО РАН, ИОХ, ИХФ, ИПХФ РАН
- ВУЗы, осуществляющие исследования и подготовку кадров в данной области: МГТУ, Военмех, ТГУ, МХТУ, СПб политехнический университет, Казанский университет
- Государство. Роскосмос, Росбоеприпасы.

Выводы:

Ключевые технологии, которые надо развивать исходя из существующих в стране возможностей и заделов, перспектив получения высоких технико-экономических результатов:

- 1) Разработка методов и эффективных технологических процессов органического синтеза новых высокоэнергетических материалов.
- 2) Разработка новых высокоэнергетических систем для нового поколения ракетно-космической техники.
- 3) Разработка экологических («зеленых») высокоэнергетических материалов.
- 4) Нанотехнологии для высокоэнергетических материалов (например, применение и технологии введения нанометаллов).
- 5) Суперкомпьютерные технологии моделирования процессов в высокоэнергетических системах для снижения количества чрезвычайно дорогостоящих огневых испытаний.

- 6) Использование высокоэнергетических материалов в технологиях производства металлов и сплавов со специальными свойствами, используемых при производстве вооружения и военной техники.
- 7) Технологии использования высокоэнергетических материалов для превращения химической энергии в электромагнитную.
- 8) Технологии утилизации высокоэнергетических материалов.
- 9) Технологии образования для подготовки специалистов в области высокоэнергетических материалов

2.5.5 Порошковая металлургия и новые сплавы

Мотивация – почему именно эта область важна для развития нового производства

Конкурентоспособность разрабатываемых транспортных и космических систем, изделий общего машиностроения в значительной степени определяется физико-механическими характеристиками конструкционных элементов и применяемых при их изготовлении материалов и технологий. Для создания и производства нового поколения изделий ракетно-космической техники, авиастроения, судостроения необходимы изделия, функционирующие в условиях интенсивных динамических и тепловых воздействий. Изделия, работающие в условиях пониженных температур (например, детали двигателей, крепежные элементы конструкций арктических судов, космических аппаратов) или повышенных температур (лопатки компрессоров турбин авиационных двигателей) изготавливают из сплавов, характеризующихся высокой ударной вязкостью, которая является показателем способности материала быстро поглощать энергию динамического воздействия.

Для получения изделий небольшого размера и массы (до 300г) сложной геометрической формы, ведущими зарубежными компаниями внедрены и широко применяются технологии инжекционного формования порошковых композиций (powder injection molding или PIM технологии). В основе PIM технологии лежит объединение методов формования и спекания порошков, что позволяет получать детали сложной геометрической формы в многоцветовой оснастке и снизить или совсем устранить необходимость дальнейшей механической обработки. По сравнению с традиционными технологиями литья и порошковой металлургии, PIM-технологии обеспечивают снижение в 5 и более раз себестоимость изготовления изделий сложной геометрической формы.

В ведущих зарубежных странах такие РИМ-технологии развиваются уже более 30 лет. В частности, в 2012 году в эту деятельность вовлечено около 800 компаний (производители, поставщики сырья и деталей, институты), а продажи изделий, полученных по РИМ-технологиям, составляют около \$1.5 млрд. Продажи на рынке РИМ к 2017 оцениваются до \$4 млрд. В том числе около 30% рынка – США, 30% - ЕС, 40% - страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Около 82% рынка РИМ составляют изделия, изготовленные на основе металлических порошков (МІМ технологии), остальные 18% - на основе керамических порошков (СІМ технологии). Основной материал на рынке РИМ – нержавеющая сталь, далее по объемам продаж – РИМ изделия из сплавов железа, алюминия (всего данная группа изделий составляет 80% рынка РИМ). Последние 10 лет рост рынка МІМ составил 9% в год. В 2012 в отрасль было вовлечено 13800 чел (выручка \$114 тыс. на 1 человека в год).

Бурный рост РИМ-технологий происходит в Китае – последние годы создано, в т.ч. при господдержке, около 150 компаний, ориентированных на освоение данной технологии. Очевидно, что уже в ближайшем будущем Китай станет одним из крупнейших игроков на рынке РИМ. Объем поставок металлического порошка на рынок МІМ в 2012 составил около 11 тыс. тонн. При потенциале отечественного рынка на уровне 1% от мирового, емкость рынка РФ составляет от 500 до 1000 млн руб. в год.

Какие смежные сферы она затрагивает, какие условия важны для ее развития

Для обеспечения развития производства порошковых композиций необходимо кратное увеличение ассортимента выпускаемых порошков металлов и соединений.

Текущие и прогнозные возможности данной области

Применяемые для РИМ технологий порошковые композиции и режимы их обработки при формовании и спекании изделий не обеспечивают требуемые в экстремальных условиях эксплуатации показатели механических свойств – прочности, ударной вязкости. Эти ограничения сдерживают применение РИМ изделий во многих высокотехнологичных отраслях, таких как ракетостроение, судостроение, авиастроение, оружейная промышленность и других.

Параметры спроса: что и кому дает развитие этой области, на какие индустрии и/или их подотрасли влияет

Сегодня в РИМ изделиях заинтересованы десятки предприятий авиакосмической, оборонной, нефтегазовой, атомной отраслей промышленности, общего машиностроения. Организации – участники ТП «Легкие и надежные конструкции» являются потенциальными потребителями результатов проекта, в том числе ОАО «Ракетно-

космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева». Детали, изготавливаемые по РИМ технологии, используются в самых разных областях: автомобилестроение; точное машиностроение, приборостроение, авиаракетостроение, машиностроение; медицина; бытовая техника, потребительские товары, спортивный инвентарь, музыкальный инструмент, ювелирная и часовая промышленность.

Материалы являются ключевым компонентом для реализации РИМ технологий. Организация производства фидстоков для РИМ технологий позволит обеспечить высокотехнологичные отрасли промышленности изделиями сложной формы, функционирующими в условиях высоких динамических и тепловых нагрузок; исключить технологическую зависимость от зарубежных компаний - поставщиков изделий для отечественного производства; снизить себестоимость изготовления изделий сложной формы за счет отказа от дорогостоящих операций механической обработки; повысить конкурентоспособность высокотехнологичных изделий на международном и отечественном рынках.

Роли заинтересованных сторон:

- Промышленность – потребители ППТ. В настоящее время конкурентоспособность отечественного производства изделий ракетно-космической, авиационной техники, автоматического оружия, атомной промышленности определяется миниатюризацией изделий, повышением удельной прочности нагруженных деталей и снижением себестоимости их производства. Все эти возможности предоставляют РИМ технологии, позволяющие снизить затраты времени, трудовых ресурсов, инструмента, энергии и отходов при изготовлении больших партий изделий сложной формы.
- Промышленность – поставщики ППТ. Компании – производители технологического оборудования химической промышленности, порошковой металлургии. В России – небольшие предприятия, разрабатывающие и изготавливающие оборудование для производства порошковых материалов.
- Академия. Фундаментальные и прикладные исследования в области способов получения наноразмерных порошков, трубок и других наноразмерных структур для создания нового поколения материалов, инженерии поверхности, синтеза композиционных материалов.
- Вузы. Подготовка специалистов в области современной порошковой металлургии.

- Государство. Финансовая поддержка исследований в предметной области (в рамках федеральных программ). Инвестиции в развитие производственной исследовательской инфраструктуры.

Относительные масштабы влияния на такие параметры, как:

- Ускорение инноваций. Улучшение технико-экономических характеристик материалов, приведет к существенному изменению спроса на продукцию ряда отраслей.
- Повышение конкурентоспособности промышленности. Создание новых производств композиционных материалов определяет более чем на 90% долгосрочное будущее (конкурентоспособность) ключевых отраслей промышленности.
- Сокращение сроков разработки новой продукции. Создание производства новых композиционных материалов обеспечит конструкторов и инженеров техническими решениями.
- Снижение себестоимости. Создание новых производств композиционных материалов позволит снизить себестоимость изготовления серийных партий продукции.
- Другие эффекты. Импортозамещение.

Оценки для России (прогнозные)

В России РІМ-технологии практически не применяются. Известны несколько отечественных компаний, выпускающие небольшие партии РІМ-изделий из материалов зарубежного производства.

Барьеры развития – научные и технологические

Основным технологическим барьером является низкое обеспечение сырьевой базой – порошками металлов и соединений микронного и субмикронного размеров. Кроме того, требуется оборудование для гомогенизации ультрадисперсных и микронных порошков.

Выводы:

Востребованным направлением является организация производства широкого ассортимента порошков для обеспечения авиакосмической, транспортной и других высокотехнологичных отраслей изделиями с повышенными механическими характеристиками по конкурентоспособной цене.

2.5.6 Список литературы

1. Engquist W.E.B. et. al. Commun. Comput. Phys. 2(3) 2007, 367-450
2. Psakhie S.G. et al. Physical Mesomechanics, (14) 2011, 224-248.

3. Elliott J. A. Int. Materials Reviews. (56) 2011, 225
4. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла. (nami.ru/upload/AT_metall.pdf)
5. Доступная 3D печать: для науки, образования и устойчивого развития под ред. Э. Канесс, К. Фонд, М. Дзеннаро (notabenoid.com/book; 3d_print.jofo.ru)
6. www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/#ixzz3D7PJbbni
7. ЦСР «Северо-Запад» по данным CIMData
8. RAND Corporation (<http://www.rand.org>) Обеспеченность применения новых технологий в сфере передовых материалов в отдельных странах (ТОП-16 технологий по рейтингу RAND Corporation)
9. International design conference - design 2008/Dubrovnik - Croatia, May 19 - 22, 20.
10. ЦСР «Северо-Запад» (www.csr-nw.ru) по материалам isicad.ru, pcweek.ru, СПб ГПУ
11. National Research Council (www.nas.edu)
12. Серия докладов в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» – Санкт-Петербург, 2012. – Вып.2 - 93 с.
13. Суханов Ю.С. Финансовые показатели ключевых разработчиков САПР/PLM за 2011 г. Часть I. / Обзор доходов «королей» // CAD/CAM/CAE Observer, 2012, № 3, 10 – 25.
14. Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу. Компьютерный инжиниринг Северо-Запад. Москва – Санкт-Петербург (2012, csr-nw.ru/upload/file_content_1243.pdf)
15. 3D Printing of Interdigitated Li-Ion Microbattery Architectures//Advanced Materials, June 17, 2013 DOI: 10.1002/adma.201301036
16. Y. Kemal Yıllıkçı, F. Findık A Survey of Aircraft Materials: Design for Airworthiness and Sustainability// Periodicals of engineering and natural sciences, Vol. 1 No. 1 (2013)
17. Kevin Michaels Aerospace Supply Chain & Raw Material Outlook SpeedNews 4th Aerospace Raw Materials & Manufacturers. Supply Chain Conference, March 3, 2014, Beverly Hills, California
18. Global Market Overview on Li-ion Batteries. Technology & Market Drivers for Stationary and Automotive Battery Systems// Batteries 2012, Nice, France, October 24-26, 2012
19. M.Peter and C.Leyens Aerospace and space materials//Materials science and engineering, vol.III, Aerospace and space materials
20. PIM 2013 Market study Randall M. German and Sundar V. Atre

21. Семенов Б. И., Рапохина С. С., Седых А. М. Новые точки роста в традиционных технологиях заготовительного производства// Наука и образование. № 08, август 2011
22. Metal injection moulding: the process and the design// Metallurgy 2009/2010. Macro ACTIS GRANDE
23. Н.Е. Калинина, О.А. Кавац, В.Т. Калинин Повышение технологических свойств литейных алюминиевых сплавов при модифицировании нанодисперсными частицами./ Авиационно-космическая техника и технология – 2010 - №4(71) – с.17-20
24. Н.Е. Калинина, А.Е. Калиновская, В.Т. Калинин, А.С. Дудников Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов./ Авиационно-космическая техника и технология – 2012 - №7(94) – с.23-26
25. Jai-Sung Lee, Joon-Phil Choi and Geon-Yong Lee. Consolidation of Hierarchy-Structured Nanopowder Agglomerates and Its Application to Net-Shaping Nanopowder Materials // Materials 2013, 6, 4046-4063.
26. You Woo-Kyung, Choi Joon-Phil, Yoon Su-Min, Lee Jai-Sung. Low temperature powder injection molding of iron micro-nano powder mixture // Powder technology, 2012, vol. 228, pp. 199-205.
27. Andy Tirta, Yus Prasetyo, Eung-Ryul. Baek, Chul-Jin. Choi , Hye-Moon. Lee. Advanced Micromanufacturing for Ultra Precision Part by Soft Lithography and Nano Powder Injection Molding // World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:3 № 5, 2009, p. 246-249.
28. Javad Rajabi, Norhamidi Muhamad, Abu Bakar Sulong. Effect of nano-sized powders on powder injection molding: a review // Microsyst Technol (2012) 18:1941–1961
29. Н. Е. Калинина, Т. В. Носова Влияние модифицирования на структуру и свойства кремний-марганцовистых сталей // Металознавство та термічна обробка металів . - 2013. - № 1. - С. 62-68.
30. Семенов Б. И., Рапохина С. С., Седых А. М. Новые точки роста в традиционных технологиях заготовительного производства// Наука и образование. № 08, август 2011
31. Metal injection molding for automotive applications / Boney A Mathew, Richard Mastromatteo / Metal Powder Report. Volume 57, Issue 3, March 2002, pp. 20 – 23.
32. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, ISBN 0-9754429-8-8, 286 p, 2012.

3. Предложения по адресным мерам государственной политики по развитию новых производственных технологий

Исходя из анализа мировой практики, накопленного опыта инновационной политики России и общей логики развития «прорывных» технологий общая структура федеральных мероприятий по поддержке новых производственных технологий может включать следующие меры.

- 1. Формирование программы честно-государственного партнёрства,** интегрирующей пять направлений развития новых производственных технологий. Каждое направление рассматривается как крупный проект. Реализация проектов может осуществляться через разные механизмы. Первый вариант – проект возглавляет назначенная правительством головная организация, отвечающая за его развитие. Вторым вариантом – формирование проектных консорциумов. Первый путь содержит в себе риск монополизации направления ведущей компанией,

выступающей в качестве головной. Второй путь, по нашему мнению, предпочтительнее, так как создает основу для лучшей балансировки интересов бизнеса и разработчиков технологий.

2. Создание проектных консорциумов: консорциумы формируются по выделенному направлению, работа ведется на проектной основе, а не базового финансирования, с привлечением средств промышленности. Проектные консорциумы создаются с целью разработки и коммерческого освоения, в том числе на мировых рынках, отдельных наиболее перспективных групп продукции на основе единых технико-технологических платформ.

Стратегический выбор направлений, по которым могут формироваться проектные консорциумы, остается за государством. При этом критерии, которые целесообразно принимать во внимание при определении областей поддержки, могут быть следующие:

- 1) Ключевой фактор - наличие компаний, заинтересованных в развитии в данных технологий и способных к смене технологической парадигмы и организации производства
- 2) Наличие значимых научных результатов у коллективов российских исследователей
- 3) Ориентация компаний на мировые рынки
- 4) Приоритетность области с точки зрения национальных интересов (определяется на государственном уровне)

В рамках консорциума заключаются соглашения между компаниями, ориентированными на разработку и производство новых технологий с одной стороны, и крупными компаниями-потребителями, с другой стороны. В соглашении должна быть указана готовность крупных компаний к закупкам новых технологий и устройств при условии выполнения требований по их функциональности и стоимости.

Специфика консорциумов заключается также в том, что выбираются головные организации по управлению отдельными видами деятельности, в том числе финансовыми потоками, активами, интеллектуальной собственностью. Такие аспекты, как наличие самостоятельного юридического лица и тип организационно-правовой формы, не имеют принципиального значения для работы консорциума.

Во главе консорциума – Правление, определяющее стратегию работы и осуществляющее общее руководство; совет директоров, научно-технический совет. Состав Правления должен назначаться межведомственной комиссией, в состав которой входят представители МОН, Минпромторга, ФАНО, Минэкономразвития.

Требования по составу участников: помимо крупных (якорных) компаний в составе консорциумов должны присутствовать компании среднего бизнеса, которые формируют спрос на технологии и новую организацию производства. Важно также наличие малых компаний, оказывающих разнообразные услуги средним фирмам. *Целесообразно рассмотреть возможность введения требования выделять определенную долю финансирования на поддержку малых фирм-участников проектного консорциума.*

С точки зрения выбираемых тематик при создании консорциумов целесообразно осуществить сквозную увязку приоритетов фондов и институтов развития, в том числе РНФ, РФФИ, Фонда развития промышленности, федеральных целевых программ министерств (Минпромторга, Министерства образования и науки). Это не исключает поддержку этими структурами инициативных и не приоритетных (в терминах государственной политики) проектов. Таким образом, создание проектных консорциумов повлечет за собой определенную модификацию «инновационного лифта» для выбранной группы приоритетов.

В функции проектных консорциумов должны входить:

- разработка стратегических документов («дорожных карт»), общих для всех участников консорциума;
- проведение прикладных НИОКР, обеспечение серийного производства, и оказание инжиниринговых услуг, необходимых для реализации целей консорциума;
- содействие формированию производственных цепочек за счет ресурсов консорциума;
- обеспечение аттестации и сертификации продукции новых производственных технологий (при необходимости);
- участие в разработке стандартов и регламентов в сфере деятельности консорциума.

3. Создание Центров перспективных исследований по направлениям новых технологий на базе НИИ или вузов для проведения исследований и разработки перспективных технологий на доконкурентной стадии, а также подготовки специалистов по новым направлениям технологического развития.

Центры должны обеспечивать научно-экспертную и образовательную поддержку научно-технологической деятельности компаний государственного и частного секторов с акцентом на компании малого и среднего бизнеса. В случае экономической

целесообразности они сами могут учреждать малые инновационные компании по своему профилю.

Схема финансирования Центров может быть заимствована из зарубежного опыта: от 1/3 до 1/2 могут составлять средства государственного бюджета, и 1/2 (или 2/3) – иные источники. Иные источники в свою очередь разделяются на средства промышленности и другие ресурсы (например, регионов). Из средств бюджета в первую очередь закупается дорогостоящее оборудование.

Центры составляют 5-летний план развития, анализируемый и корректируемый ежегодно. Бюджетное финансирование может выделяться на 5 лет с возможностью продления.

Центры работают на основе скоординированной программы исследований (и разработок), ориентированной на получение исследовательских результатов, необходимых для успешной реализации программ разработки технологий и устройств промышленными компаниями.

Для координации тематик работ между направлениями программы и обеспечения взаимодействия со структурами, выступающими в качестве источников финансирования, целесообразно создать Советы по пяти направлениям новых производственных технологий. В Советы входят представители компаний-заказчиков, организаций, ведомств (Министерства образования и науки, Министерства промышленности и торговли, ФАНО), фондов и институтов развития, берущих на себя финансирование работ соответствующих типов.

Центры не являются закрытыми структурами. Они могут работать как на заказы консорциумов (якорных заказчиков), так и на внешний рынок.

4. Инфраструктурная поддержка:

Поскольку в выбранных направлениях перспективных производственных технологий снижены барьеры входа на рынок для малых и средних компаний (ввиду ориентации на индивидуализацию и аутсорсинг), одним из опорных элементов развития становятся средние компании. Оптимизация их работы может идти за счет стимулирования (со стороны местных администраций, технопарков, зон) создания связей между средними и малыми компаниями. При этом малые компании выполняют обслуживающие функции по отношению к средним предприятиям, в том числе производя необходимые детали, компоненты и осуществляя серийное производство.

Для реализации этой функции на объектах инфраструктуры региональная администрация может оказывать поддержку технопаркам, за счет обеспечения льготной

аренды оборудования для малых фирм, оказывающих услуги средним и крупным компаниям. Кроме того, Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и другие фонды поддержки малых компаний, могли бы поддерживать разные виды кооперации малых и средних (крупных) предприятий. В частности, возможно более активное задействование инструмента инновационных ваучеров, а также выделение грантов на переобучение персонала малых и средних предприятий.