

Сколковский институт
науки и технологий

Новые производственные технологии

Публичный аналитический доклад



| Издательский дом ДЕЛО |

Москва | 2015

Коллектив авторов

Дежина Ирина Геннадиевна, руководитель авторского коллектива, д-р экон. наук, руководитель группы по научной и промышленной политике, Сколтех (разделы 1, 3, 4, 5); **Пономарев Алексей Константинович**, вице-президент по государственным программам и кооперации с промышленностью, Сколтех, канд. техн. наук (разделы 2, 5); **Фролов Александр Сергеевич**, аналитик по промышленной политике, Сколтех (разделы 1, 3, 5); **Зорин Денис Николаевич**, профессор Сколтеха, PhD (компьютерные науки) (раздел 2); **Псахье Сергей Григорьевич**, профессор, Сколтех, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук (раздел 2); **Гурдал Зафер**, профессор Сколтеха, PhD (технические науки) (раздел 2); **Азаров Андрей Валерьевич**, старший научный сотрудник Сколтеха, канд. техн. наук (раздел 2); **Абаимов Сергей Германович**, старший научный сотрудник Сколтеха, канд. физ.-мат. наук (раздел 2); **Белов Михаил Валентинович**, зам. генерального директора ИБС, канд. техн. наук (раздел 2); **Данилин Иван Владимирович**, зав. сектором ИМЭМО РАН, канд. полит. наук (раздел 3); **Ефимов Альберт Рувимович**, директор Центра робототехники «Сколково» (раздел 2); **Куракова Наталия Глебовна**, директор Центра научно-технологической экспертизы РАНХиГС, д-р биол. наук (раздел 4); **Зинов Владимир Глебович**, главный научный сотрудник РАНХиГС, д-р экон. наук (раздел 4); **Цветкова Лилия Анатольевна**, ведущий научный сотрудник РАНХиГС, канд. биол. наук (раздел 4); **Еремченко Ольга Андреевна**, старший научный сотрудник РАНХиГС (раздел 4).

Н72 Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. — М. : Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. — 272 с.

ISBN 978-5-7749-1064-9

Исследование подготовлено на основе научно-исследовательской работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор научно-исследовательской работы RFMEFI57114X0001).

УДК 004
ББК 32.81

ISBN 978-5-7749-1064-9

© ФГБОУ ВПО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», 2015

Оглавление

1. Введение	7
1.1. Цели и задачи доклада	7
1.2. Целевая аудитория доклада	8
1.3. Определение и структура новых производственных технологий	8
1.4. Мировые и российские рынки новых производственных технологий	11
1.5. Изменения в обрабатывающей промышленности	19
2. Ключевые технологии, формирующие облик перспективного производства	23
2.1. Перспективные технологии организации производства и управления им.	23
2.1.1. Определения	23
2.1.2. Мотивация	24
2.1.3. Современные направления и результаты развития технологий организации и управления производством	25
2.1.4. Новые тренды развития технологий организации производства и управления им	31
2.1.5. Обобщение и анализ	43
2.1.6. Оценки перспектив для России	48
2.2. Компьютерные технологии для моделирования и производства изделий	52
2.2.1. Определения и сокращения	52
2.2.2. Мотивация	53
2.2.3. Основные технологии CAD и CAE	55
2.2.4. Ведущие международные производители CAD- и CAE-систем: тенденции развития	59
2.2.5. Российские производители CAD- и CAE-систем: тенденции развития	74
2.2.6. Обобщение и анализ	78
2.2.7. Оценки перспектив для России	85
2.3. Промышленная и сервисная робототехника	87
2.3.1. Определения и типология робототехники	87
2.3.2. Экономические и социальные факторы развития робототехники	88

2.3.3. Структура отрасли промышленной и сервисной робототехники	91
2.3.4. Текущее развитие технологий промышленной и сервисной робототехники за рубежом	97
2.3.5. Перспективные направления и мировые центры разработок в области промышленной и сервисной робототехники	104
2.3.6. Состояние российской промышленной и сервисной робототехники	106
2.4. Аддитивное производство	109
2.4.1. Основные определения и рынки аддитивного производства.	109
2.4.2. Технологии и оборудование аддитивного производства.	112
2.4.3. Текущее и перспективное применение аддитивного производства.	124
2.4.4. Препятствия на пути распространения технологий аддитивного производства.	131
2.4.5. Направления исследований	136
2.4.6. Аддитивное производство в России: текущее состояние и перспективы	146
2.5. Новые материалы	147
2.5.1. Спроектированные материалы	147
2.5.2. Металлопорошковые материалы для аддитивных производственных технологий	156
2.5.3. Технологии инъекционного литья из порошковых композиций	166
3. Зарубежный опыт государственной поддержки развития новых производственных технологий.	189
3.1. Современная политика США по развитию НПТ	190
3.2. Государственная инновационная политика в области поддержки развития НПТ в Великобритании	196
3.3. Основы формирования инновационной политики ФРГ в сфере НПТ	204
3.4. Выводы для России из зарубежного опыта государственной инновационной политики по поддержке НПТ	212
3.5. Российский опыт использования инструментов, релевантных для развития новых производственных технологий	213
4. Библиометрический и патентный анализ развития новых производственных технологий.	217
4.1. Информационные технологии для управления производственным циклом	217
4.2. Компьютерные технологии для моделирования и производства изделий	221

4.3. Промышленная и сервисная робототехника	223
4.4. Аддитивное производство (трехмерная печать)	226
4.5. Компьютерный дизайн с использованием теоретических моделей и баз данных для направленной ускоренной разработки новых материалов с заданными свойствами	229
4.6. Композиты, «иерархические» материалы, сконструированные по подобию природных биоматериалов	233
4.7. Легкие сплавы для авиационной и автомобильной промышленности	236
4.8. Порошковая металлургия и новые сплавы	239
4.9. Обсуждение результатов	242
4.10. Ограничения наукометрического анализа	243
5. Заключение	247
Литература	253
Благодарности	271

1. Введение

1.1. Цели и задачи доклада

Целями публичного аналитического доклада по новым производственным технологиям (НПТ) являются 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 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 стимулирующие технологическое развитие;
- представителей 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 И СТРУКТУРА НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ 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 по изучению причин, содержания и перспектив развития новых технологий. Тем не менее до настоящего времени не выработано общепринятого определения НПТ [1].

Наиболее широко используется понятие «передовое производство» (*advanced manufacturing*), введенное Национальной ассоциацией 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 преимущества массового производства, гибко настроенную на необходимый в данный момент объем выпуска и в то же время обладающую высокой степенью кастомизации с целью быстрого реагирования на потребности клиентов».

Помимо этого определения используются и другие. 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 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, полученных 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 производства [1].

В настоящее время нет устоявшейся точки зрения и на то, какие виды технологий объединяет синтетическое понятие НПТ. В докладе мы используем следующую сегментацию НПТ (табл. 1).

Таблица 1. Основные сегменты и примеры технологий, входящих в НПП

Сегменты НПП		Традиционные техника и технологии (примеры)		Новые техника и технологии (примеры)
Технологии организации и управления		Системно-инженерные подходы, <i>LEAN</i>	→	Интеллектуальное производство, альянсы, облачное производство
ИТ-системы, обеспечивающие поддержку ЖЦ продукции	Многомерное моделирование сложных изделий	<i>CAD/CAE/CAM, PDM</i>	→	CAx для аддитивных технологий, облачные технологии, M2M
	Интеллектуальные системы управления производством			
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	→	Композиционные материалы, металлы, керамика и др.

Источник: Составлено авторами.

1.4. МИРОВЫЕ И РОССИЙСКИЕ РЫНКИ НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Мировые рынки НПТ

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%. Краткий 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 (рис. 1). Среднегодовой темп прироста рынка за 2010–2012 гг. составил более 27%.

На рынке оборудования наблюдался взрывной рост продаж персональных 3D-принтеров, темп их роста в 2008–

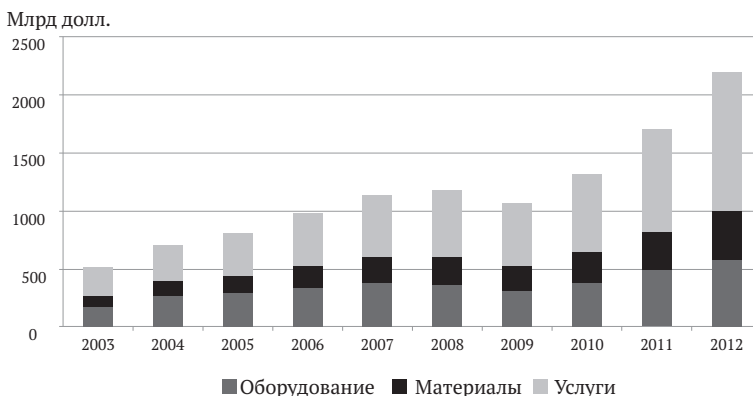


Рис. 1. Динамика и структура рынка аддитивных технологий в мире

Источник: Рассчитано авторами на основе [4].

2011 гг. измерялся трехзначными цифрами. Продажи промышленных 3D-принтеров также растут, хотя и не столь быстрыми темпами.

На рынке материалов в 2012 г. более половины занимают продажи фотополимеров, еще почти четверть рынка — полимеры для лазерного спекания. Доля металлов в 2012 г. составляла только около 6% продаж материалов для 3D-печати в мире.

Согласно прогнозам *Wohlers Associates*, к 2021 г. мировой рынок 3D-печати может достигнуть размера 10,8 млрд долл., что соответствует среднегодовому темпу роста в 2013–2021 гг. 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% общего количества 3D-принтеров, установленных за период 1988–2012 гг. [4].

Робототехника

В 2013 г. объем мирового рынка промышленной робототехники оценивался в 9,5 млрд долл. А если учитывать смежные рынки (рынки ПО для робототехники, периферийное оборудование и др.), то объем мирового рынка робототехнических систем в 2013 г. составлял порядка 29 млрд долл. [5].

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 (рис. 2).

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

Согласно оценкам *McKinsey*, к 2025 г. 15–25% рабочих мест в промышленности и сельском хозяйстве в развитых странах



Рис. 2. Динамика производства промышленных роботов в мире, тыс. шт.

Источник: [6].

могут быть экономически эффективно замещены роботами [7]. По оценкам BCG, мировой рынок промышленных роботов может достичь к 2025 г. 24,4 млрд долл. [8], что соответствует среднегодовому темпу прироста рынка примерно на 8,3%.

Композиционные материалы

Мировой рынок композиционных материалов в 2011 г. оценивался примерно в 19,6 млрд долл., причем рынок конечной продукции из композиционных материалов — в 55,6 млрд долл. [9].

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

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% [10].

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

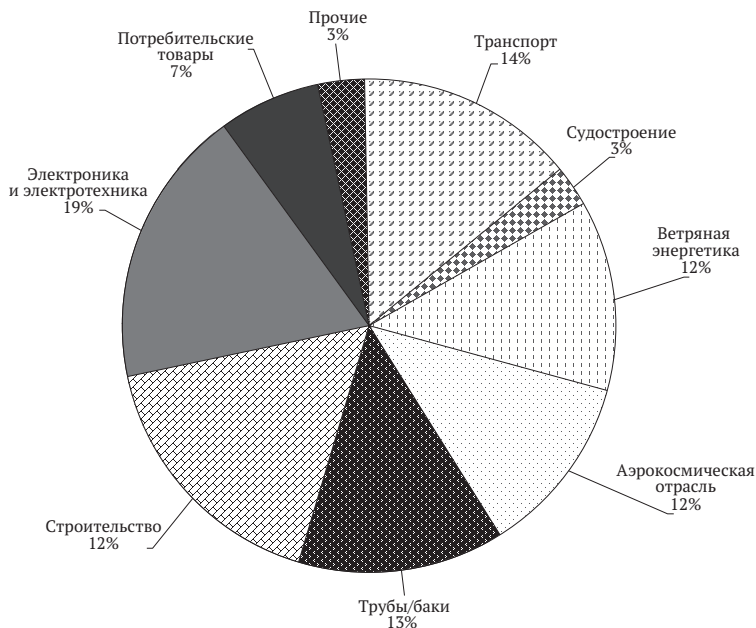


Рис. 3. Отраслевая структура мирового рынка композиционных материалов
Источник: Построено на основе [10].

Рынок программных продуктов для разработки предметов производства

Мировой рынок программных продуктов для разработки предметов производства (в структуре, представленной компанией *CIMdata*)¹ 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%, тем-

¹ В данную категорию не входят системы электротехнического и электронного, архитектурного и строительного проектирования, специализированные инструменты и др. [11].

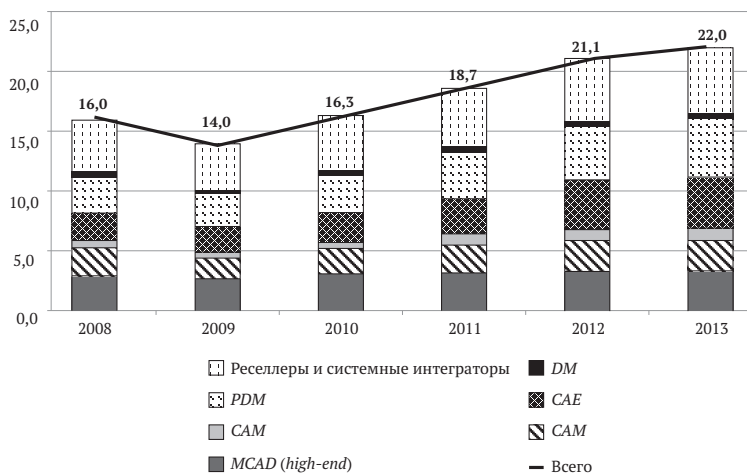


Рис. 4. Динамика и структура мирового рынка программных продуктов для разработки предметов производства, млрд долл.

Источник: На основе [12].

пы прироста в сегментах *CAM* и *CAE* были существенно выше — 13–14% (рис. 4).

По прогнозам *CIMdata*, общий рынок к 2017 г. превысит 50 млрд долл., а среднегодовые темпы роста составят 8,7% [12].

Рынки НПТ в России

В настоящее время в России в большинстве отраслей, которые являются разработчиками НПТ, сложилась достаточно тяжелая ситуация, характеризующаяся, с одной стороны, доминированием иностранных компаний на рынках НПТ, с другой — существенными проблемами отечественных компаний, препятствующими увеличению их конкурентоспособности (дорогие финансовые ресурсы, дефицит высококвалифицированных инженерных кадров, устаревшие основные фонды и т. п.).

Так, например, в станкостроении в последние годы доля отечественных производителей на внутреннем рынке составляла 5–10% (для сравнения: в СССР в 1985 г. доля отечествен-

ных производителей в потреблении станков составляла около 92%¹).

В то же время в ряде отраслей (прежде всего это отрасли, связанные с разработкой инженерного ПО, композиционных материалов и изделий из них, лазерного оборудования) отечественные компании сумели занять определенные рыночные ниши и сохранить технологический уровень, близкий к мировому.

В области выпуска промышленной робототехники и 3D-принтеров российские производители только начинают формироваться и пока не претендуют на существенную долю рынка.

Точные оценки как объема рынков, связанных с НПТ, так и долей отечественных компаний на них затруднены из-за проблем с доступностью статистической информации. Имеющиеся оценки ситуации на российских рынках НПТ отражены в табл. 2.

Таблица 2. Объем российских рынков, связанных с производством НПТ, и оценка долей отечественных компаний на них в 2012 г.

Рынок	Объем рынка*, млн долл.	Доля отечественных компаний*, %
Станкостроение (металлообработка)	1712 (2013)	5–10
В том числе лазеры	332 (2013)	26
Инженерное ПО (<i>mCAD, mCAM, mCAE, cPDM</i> , проч.)	205	30
3D-принтеры	< 3	< 5
Промышленная робототехника	40	< 5
Композиционные материалы	< 350	20

* Оценочно.

Источники: [14–21].

¹ Доля рассчитана на основе статистики по станкостроению (в штуках) на основе данных [13].

Проблемы доступности статистической информации по рынкам НПТ

Анализ ситуации в отраслях — производителях НПТ в России затрудняется отсутствием общедоступной статистики по многим рынкам, связанным с НПТ. Так, практически отсутствуют данные по рынкам оборудования для промышленной автоматизации, оборудования для обработки пластиков и т. д.

Более детализированную информацию удастся получить по данным таможенной статистики (табл. 3).

Таблица 3. Объем экспорта и импорта по отдельным рынкам, связанным с НПТ, в 2013 г., млн долл.

Продуктовые группы	Код ТНВЭД	Импорт	Экспорт	Импорт/экспорт (разы)
Станки	8456–8466	2839	100	28
В том числе: лазерные	845610	83	3	25
для обработки неметаллических изделий	8464–8465	650	5	119
Части и принадлежности	8466	309	28	11
Оборудование для обработки резины и пластмасс, печи и камеры, машины для сварки, опоки для литья, литейные машины, металлопрокатные валки и станы	8454 8455 8477 8480 8514 8515	2767	142	20
Приборы для контроля и управления	9024–9032	3383	865	4
Углеродистые материалы, стекловолокно и изделия из них, эпоксидная смола	390730, 681510, 7019	342	147	2
Промышленные роботы	847950	41	1	70
Всего		10 414	1292	8

Источник: База данных ТН ВЭД.

Однако даже по данным ТНВЭД зачастую трудно четко выделить статистику, относящуюся именно к НПП.

Так, данные по внешней торговле 3D-принтерами включены в код ТНВЭД 847759 (прочие машины для литья и формования), однако получить статистику отдельно по 3D-принтерам на основе открытых данных ТНВЭД (данные доступны максимально в 6-значном коде) невозможно, так как 3D-принтеры отражаются по 10-значному коду (8477598000). Аналогичная ситуация с углеродным волокном и изделиями из него (углеродные волокна проходят по 10-значному коду 6815101000).

Также из общего объема электромеханического оборудования (отраженного, например, по кодам 8535–8537, 9541 и др.) не удастся выделить оборудование, используемое для нужд промышленной автоматизации (реле, переключатели и проч.). То же самое относится и к приборам для контроля и управления (коды 9024–9032).

Данные Росстата по производству частично доступны только для станкостроительной отрасли, выделение объемов производства по другим отраслям, связанным с НПП, затруднено.

Использование статистики баз данных предприятий (например, СПАРК) также представляется затруднительным, так как зачастую в выручке предприятий, связанных с НПП, значительная доля приходится не на оборудование (или материалы, услуги) связанное с НПП, а на прочие доходы, что не позволяет корректно оценить размеры рынков НПП.

Представляется, что наиболее релевантным источником информации являются различные отраслевые или некоммерческие организации, однако по многим рынкам, связанным с НПП, подобных организаций или нет, или они не раскрывают необходимую информацию, в результате чего зачастую оценка рынков опирается на мнения или экспертов, или отдельных участников рынков.

В развитых странах и на мировом уровне оценка рынков, связанных с НПП, ведется в основном или различными отраслевыми объединениями, или специализирующимися на этих рынках консалтинговыми компаниями (*Gardner, CIMdata, Wohlers Associates, IFR* и др.), собирающими и представляющими

информацию по данным рынкам в открытом доступе или за плату.

Таким образом, для повышения информационной прозрачности российских рынков НПП необходим существенный рост роли отраслевых организаций и открытости их данных.

1.5. ИЗМЕНЕНИЯ В ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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.).

Внедрение новых методов и подходов к управлению производством, развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) параллельно с процессами глобализации производственных цепочек в 1970–2000-х гг. существенно изменили облик обрабатывающей промышленности. Широкое применение на практике концепций жизненного цикла, «расширенных предприятий», системно-инженерных методов фактически изменило парадигму разделения труда (разделы 2.1.2 и 2.1.3). Началось формирование распределенных производственных цепочек сложной конфигурации, ориентированных на «бережливое» производство, использование дешевых ресурсов по всему миру и выполнение жестких стандартов качества [22]. 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 происшедшим 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 лидеров¹, 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 новых 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 одно из ключевых направлений действий — это рещоризация, или возврат, производственных мощностей в страну, размещение их вблизи центров НИОКР.

Для стран Западной Европы основной целью является сохранение лидерских позиций по ряду сегментов на высокотехнологичных рынках в условиях активного развития производственных технологий в США и Китае. Китай, в свою очередь, ставит задачу развития новой индустрии для того, чтобы в большей мере опираться на собственные силы.

Важным фактором, способствующим процессу реиндустриализации развитых экономик, становится развитие НПТ, позволяющих перейти на новые бизнес-модели, основанные на кастомизации продукции. Кастомизация обеспечивается за счет ускорения и удешевления разработки новых моделей и типов продукции на базе новых технологий (например, тех-

¹ Наиболее яркий пример — доминирование на ряде мировых высокотехнологичных рынков китайских компаний *Huawei*, *Lenovo*, *ZTE* и др.

нологий 3D-печати), а также организации гибких производственных систем, оперативно реагирующих на изменение рыночных потребностей. Она повышает роль аутсорсинга и потому 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 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 оборудования [23]. Такие компании формируют своеобразную технологическую инфраструктуру для малого и среднего инновационного бизнеса. Создание сети оказывающих услуги компаний позволяет снизить инвестиции со стороны инновационных малых и средних предприятий и повысить загрузку технологического оборудования за счет заказов со стороны внешнего рынка.

2. Ключевые технологии, формирующие облик перспективного производства

2.1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ИМ

2.1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Технологии организации производства и управления им (ОУП) — это подходы, методы, стандарты, инструменты организации взаимодействия между производственными единицами и управления ими в ходе производственного процесса. Под производственными единицами понимают (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 инструмен-

тальную часть (регламентирующие документы и информационно-технологические средства).

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

Технологии организации производства и управления им, в том числе перспективные, непосредственно реализуются в виде производственных и бизнес-процессов, выполняющихся в соответствии с регламентирующими документами и с использованием информационно-технологических средств. Эти документы и средства составляют инструментальную часть технологий ОУП и 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.

2.1.2. Мотивация

За последние десятилетия в мировой практике организации производства и управления им произошли существенные изменения, кардинально повысившие эффективность производства в целом и его элементов. Они позволили решить проблемы обеспечения качества конечных изделий/объектов (и комплекствующих), 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 высокотехнологичной продукции различных видов, а также сложных инфраструктурных объектов и комплексов (например, создание и эксплуатация изделий авиационно-космической техники, с одной стороны, и 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 и 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.

Показателем развития технологий ОУП является движение к «облачному производству», «производству как сервису», «виртуальным предприятиям» и т. п. в рамках таких программ, как, например, *Industry 4.0* [24], *Smart Manufacturing* [25], *Manufacturing Cloud* [26]. 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.

2.1.3. СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ИМ

Международная практика показывает, что для успешного решения проблем в управлении производством в последние десятилетия реализуется концепция расширенного предприятия, применяются системно-инженерные подходы и специальные методологии (например, *Defense Acquisition System*, [27] — 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 (разра-

ботку, производство, поддержку эксплуатации и утилизацию) в тесном взаимодействии с организациями заказчика.

Во-первых, такая логика создает 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 основы используются для объединения предприятий в холдинговые структуры (или другие типы юридического оформления) и для корпоративного управления.

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 изделий/объектов со стороны заказчика, постоянного доведения этих требований до всех участников кооперации, регулярного контроля реализации требований в проектных решениях, процедур внесения изменений в проектные решения по изделию/объекту/системе, контроля структуры, основных и альтернативных проектных решений, рисков и себестоимости изделия/объекта/системы, широкого использования междисциплинарного моделирования.

В-третьих, специальные методологии управления заказом (например, *Defense Acquisition System*, [27]) 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, практи-

чески 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 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 получения «тотальных дешевых инженерных расчетов и моделирования»: стало возможным моделировать суперсложные объекты, например свойства веществ и материалов (*direct numeric simulation* и аналогичные подходы), «дешево» моделировать массовые предметы, «сначала все проверить на модели, а потом отлить в металле», или «сам нарисовал — сам быстро сделал». Развитие технологий быстрого прототипирования (аддитивных и аналогичных 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 организационными единицами. Дальнейшим развитием таких форм кооперации и организации производства являются «облачное производство», «производство как сервис» и т. п.

Целевая интегрированная архитектура ИТ-средств, поддерживающих процессы начальных стадий жизненного цикла изделий (объектов) от концепции до запуска изделия в производство (передачи объекта в эксплуатацию), может быть представлена в следующем виде (рис. 5, 6).

Интегрированные таким образом ИТ-средства вместе с производственными процессами, данными об изделии (объекте) и эксплуатирующими их сотрудниками образуют систему управления проектированием/конструированием. Ядром такой системы является полная электронная структура и модель изделия (объекта) (ГОСТ-2053), (ГОСТ-2052). ИТ-средства обес-

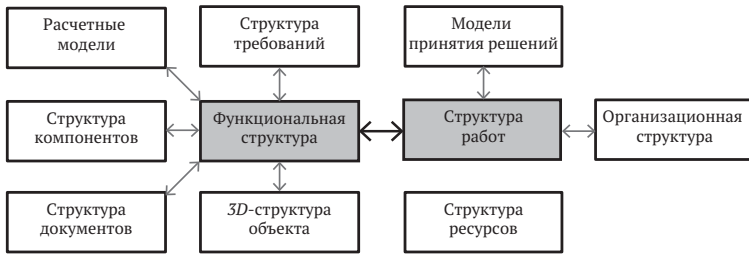


Рис. 5. Структуры основных моделей и данных об изделии (объекте)

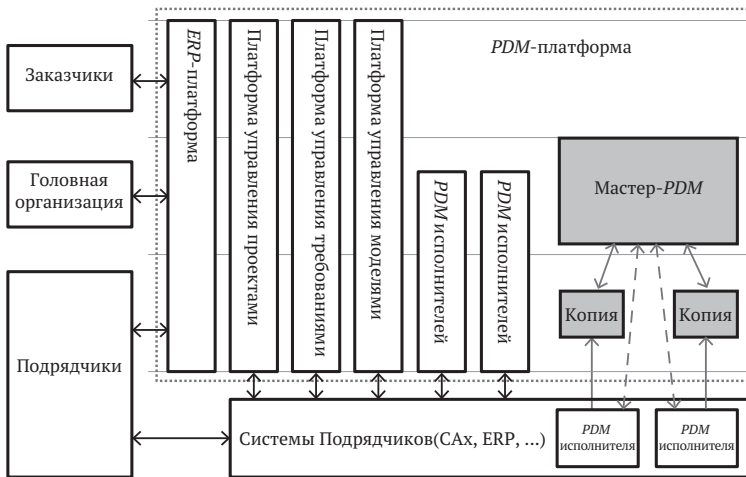


Рис. 6. Структура ИТ-платформ

печивают для работающих с ней сотрудников возможности создания проектных и технологических решений, формирования системной архитектуры изделия (объекта), управления требованиями, конфигурацией изделия (объекта), изменениями, параллельного проектирования, работы в виртуальных рабочих группах и их совместной работы, использования опыта и наработок, планирования и контроля ресурсов, затрат, финансовых результатов, рисков на всех стадиях жизненного цикла изделия/объекта/системы, управления сроками эксплуатации изделий/объектов/систем.

Аналогичные архитектурные представления (непринципиально отличающиеся от вышеприведенных) существуют и для стадий эксплуатации (в том числе для текущих ремонтов и сервиса), модернизации (в том числе капитальных ремонтов), вывода из эксплуатации и утилизации.

Важно отметить, что на российских предприятиях современные ИТ-средства внедрены достаточно широко и замена кульмана и рейсшины, как и логарифмической линейки, во многих случаях произошла. 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) [28] и управления жизненным циклом продукта/объекта/системы (*Product Lifecycle Management, PLM*, [29]), 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* [30]; управления сроками эксплуатации изделий/объектов/систем;
 - управление требованиями [31], конфигурацией [32], [33], изменениями, параллельное проектирование, виртуальные рабочие группы и их совместную работу, накопленный опыт и наработки;
- 2) модульность, платформы, крупноблочную сборку и монтаж;
- 3) модели- и датацентричность;
- 4) управление проектными программами и проектами в целом [34], а также различные расширения, такие как [35] и [36];
- 5) концепции расширенного предприятия, интеграцию данных и процессов [37];

- 6) универсальные формализмы представления данных, такие как язык представления сетевых онтологий OWL [38], стандарт представления CAD-данных STEP NC [39] и [40], средства описания объектов стандарта ISO 15926 [41];
- 7) концепции «непрерывных улучшений» — TQM, LEAN [42] и др.;
- 8) принципы безбумажного документооборота (текстовый оборот исключен);
- 9) управление *online*: отчетность, перепланирование, формирование производственного задания, закрытие периода и другие операции выполняются нажатием одной кнопки, почти автоматически, без привлечения сотрудников; выполнение операций регистрируется в системе *online*.

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;
- создание новых изделий/объектов/систем в заданные сроки, прогнозирование и максимальный учет потребностей заказчиков;
- переход к контрактам жизненного цикла, к «продаже (боевых) возможностей» вместо продажи изделий, к осуществлению сервиса в соответствии с соглашениями об уровне сервиса.

2.1.4. НОВЫЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ИМ

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

1. Инициативы развития производственных интеллектуальных систем и подходов (*manufacturing intelligence*), таких как Industry 4.0 [24] и Smart Manufacturing Leadership Coalition [25].

2. Дальнейшая глобализация кооперации (Global Product Development) [43].
3. Новые формы кооперации и межорганизационного взаимодействия, такие как *Virtual Enterprise* [44], и альянсы [45].
4. Переход к «производству как сервису» [46] и «облачному производству» [26].
5. Создание инфраструктуры «облачного производства» — *Industrial Internet* [47], [48], [49].
6. Отделение и аккумулятивное неимущественных 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 четвертой 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 интеграцией 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 формированием таким образом гибридных продуктов.

Осознавая эти тенденции, правительственные организации и промышленность различных стран инициируют создание таких систем, как *Industry 4.0*, Германия [24], и *Smart Manufacturing Leadership Coalition* [25], США, а также организации технологического развития *National Network for Manufacturing Innovation* [50], *American Lightweight Materials Manufacturing Innovation Institute* [51], *National Center for Defense Manufacturing and Machining* [52].

Проект *Industry 4.0* охватывает как промышленные технологические, так и социальные аспекты развития. Это проект, направленный на опережающее развитие информационных и компьютерных технологий. Ведущую роль в этом проекте играет *Siemens*. Некоторые компоненты *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, т. е. на создание «производственного интеллекта». 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.

Внедрение проекта *Smart Manufacturing* предполагает:

- разработать референтную *SM*-архитектуру (*Smart Manufacturing*), основанную на стандартах, инициируемую промышленными компаниями и поддерживаемую ИТ-разработчиками;
- создать *SM*-платформу разработки, включающую среду разработки с открытой архитектурой;
- реализовать *R&D*-проекты в области *SM*-систем;
- способствовать привлечению финансирования для таких проектов;
- создать пилотные зоны для внедрения *SM*-систем;
- аккумулировать и гармонизировать требования к *SM*-системам от малых, средних и крупных компаний;
- создать и облегчить доступ к новым дешевым датчикам и сетевым технологиям.

Дальнейшая глобализация кооперации

Если в течение последних нескольких десятилетий наблюдалась глобализация цепочек производителей с целью объединения функций производства, то сейчас возникает тенденция глобализации команд разработчиков продуктов [43]. Сложность продуктов требует разнообразных компетенций разработчиков, что приводит к необходимости объединения интернациональных, географически распределенных групп в рамках одной команды. Кроме того, включение региональных разработчиков позволяет оперативно и более точно реагировать на потребности локальных рынков. Следующие области выделяются как ключевые для обеспечения глобальной интеграции процесса разработки продуктов.

1. Управление CAD-данными о продукте, сформированными в различных исходных CAD-системах.
2. Управление данными о составе продукта (*Bill of Material data*).
3. Управление множеством конфигураций одновременно.
4. Управление глобальным распределенным процессом внесения изменений.
5. Управление совместной работой распределенных групп (*collaboration capabilities*).
6. Управление классификаторами состава изделия.
7. 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, совершенно необходимы для выполнения разработок в срок и в рамках бюджета. Заключительные области (6-я и 7-я) являются ключевыми для управления рисками и стоимостью разработки и производства продукта.

Появляются новые формы кооперации и межорганизационного взаимодействия, такие как альянсы *Virtual Enterprise*.

Концепция «виртуального предприятия» (*Virtual Enterprise*) интенсивно развивается в последние годы. Существует много определений «виртуального предприятия» (ВП), например: ВП — это временная сеть независимых организационных образований, в том числе бизнесов и специалистов, которые работают на самопроизвольном основании для развития конкурентных преимуществ. Они вертикально интегрируются для объединения основных компетенций и функций в одну организацию.

В рамках общеевропейской программы исследований и технологических разработок выполняется целый ряд проектов, направленных на развитие концепции ВП, в рамках которых разрабатывается широкий круг тем — от законодательных основ ВП до поддерживающих программных продуктов.

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

Другой новой формой совместной работы выступают промышленные альянсы. Эта форма реализуется в рамках программы разработки перспективного эсминца «ЗУРО» (*Air Warfare Destroyer*) для ВМС Австралии [45].

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.

Цель такой формы организации — улучшение работы кооперации (сроки, бюджет, управление рисками и боевыми возможностями корабля) за счет слома барьеров между промышленностью и заказчиком, а также между организациями промышленности на основе принципа «разделяем проблемы и 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.

Основные преимущества альянса как формы организации:

- все участники фокусируются на общем результате и избегают неконструктивного соперничества, что характерно для контрактов с фиксированной ценой;
- риски и ответственность несут совместно, что снижает конфронтацию между участниками;
- участники от промышленности могут улучшать свой финансовый результат только за счет эффективности, так как незапланированные работы не дают прибыли;
- прибыль и проблемы разделяются между правительственным участником и промышленностью эквивалентно;
- ориентация на бизнес-результат стимулирует участников при принятии решений, реализуется подход «делать как можно лучше для проекта»;
- слом перегородок между основными участниками уничтожает долгие и затратные дискуссии между ними.

Эти преимущества достигаются за счет следующих организационных особенностей альянса:

- 1) участия заказчика в процессе разработки и производства (агентство *DMO*), делающего проектную программу абсолютно прозрачной для заказчика, что соответствует идеологии [27], являющейся обязательной для применения в заказах Министерства обороны США;
- 2) «сквозных» производственных процессов в рамках кооперации, закрепленных через договор альянса и непосредственно обеспечивающих тот самый слом перегородок между всеми участниками;
- 3) специфических экономических условий договора, задающих правила ценообразования от объема работ. Основной объективной экономической проблемой таких проектных программ выступает именно ценообразование (раздел 2.1.3, про «затраты+»). Эта проблема ре-

шается применением идеи ценообразования опционов исходя из ожидаемой волатильности базового актива. Аналогом волатильности признаны 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 цен 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 управляющего директора альянса;
- управляющую оперативную команду, состоящую из директоров и менеджеров организаций альянса.

Ответственность участников альянса:

- *DMO* несет 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 корабля в целом: постройку блоков (применен метод крупноблочной сборки, поставщики отвечают за отсеки корабля в целом), за интеграцию блоков, 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 т. д.;

- *Navantia* считается разработчиком эсминца, выбранного в качестве аналога для создаваемого корабля, поэтому отвечает за разработку корабельной платформы и составляет отдельные блоки;
- *Lockheed Martin* выступает 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 сервису»

Концепция «облака» предполагает, что пользователи переносят/передают в «облако» функции для последующего их 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» [26] и «производство как сервис» (*Maas*) [46].

Идея *Maas* не сводится к аутсорсингу производственной функции, она рассматривается как путь реализации кастомизированного производства по заказу и 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 возможности реконфигурируемых виртуальных производственных сетей на основе объединенных площадок, поддерживаемых специализированным программным обеспечением.

Один из образцов разрабатываемого в рамках проекта программного обеспечения предназначен для создания библиотеки «инкапсулированных» производственных сервисов с возмож-

ностями удаленного доступа. Основой станет высокоскоростная сеть передачи данных, соединяющая «микрофабрики» под управлением ИТ-средств моделирования, проектирования, планирования, технологической подготовки производства и т. д.

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, составляет главное направление развития производства, основным предпосылками для этого считаются готовность гибких ИТ-систем, поддерживающих «облачное» производство, с одной стороны, 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 т. д. 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*), меж-

машинное взаимодействие (*M2M*), промышленный Интернет (*industrial internet*), большие данные (*Big Data*). Эти области пересекаются, их границы не являются точно определенными, но для целей данного отчета важно 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 т. д.

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.

Большие данные (*Big Data, BD*) часто понимают как область методов и инструментов обработки больших и сложных (за счет разнородности, неизвестности взаимосвязей и скорости по-

явления) массивов данных. Методы *BD* обеспечивают анализ и исследование возникающего неизвестного поведения сложных систем, облегчение, удешевление, ускорение принятия решений, более точное исследование предпочтений пользователей, за счет этого экономию ресурсов при разработке, производстве, сервисе и т. д.

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 и окружающей среды;
- самообучение на основе собираемой информации;
- проактивное принятие бизнес-решений;
- интегрированный человеко-машинный анализ данных;
- использование предсказывающих алгоритмов и подходов;
- интеграцию 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 т. д [53].

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

Существенным трендом в области ОУП является обособление и аккумуляирование не вещественных производственных функций, происходящие по 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 маржиналь-

ными. С другой стороны, сложность конечных продуктов требует усложнения процессов заказа и приобретения новых типов изделий/объектов/систем, особенно в военно-промышленном комплексе [27] и капитальной индустрии [54].

В результате компании, выпускающие конечный продукт (автопроизводители, производители авиационной техники и др.), выполняют функции исследования и прогнозирования рынка и спроса, формирования концепта продукта, технических требований, проектирования/конструирования продукта, проводят конечную сборку, сертификацию, организуют продажи, послепродажный сервис. Непосредственное изготовление компонентов все чаще передается специализирующимся на этом поставщикам. Происходит естественное разделение ниш: изготовители компонентов получают прибыль от технологической специализации и от объема выпуска, производители конечного продукта — от дизайна, интеграции и сервиса.

В качестве примера можно привести компанию *Cross Rail* [54], учрежденную 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 г., первый поезд должен пройти в 2018 г. Ко II кварталу 2014 г. была практически завершена подземная проходка под центральной частью Лондона (около 35 км), при этом отставание от исходного графика составило одну неделю, перерасхода бюджета нет.

Cross Rail была создана для выполнения функции *acquirer'a* — управления проектной программой создания сложной транспортной системы и интегрирования ее в мультисистемный контекст, т. е.:

- для управления генподрядчиками (их несколько, они разделяют строящуюся сеть по географическим фрагментам) и контроля подрядчиков нижеследующих уровней;
- управления генпроектировщиками (их несколько);
- взаимодействия с регуляторами (около 10 организаций внутри старого Лондона, в центре, в том числе археологический надзор);

- управления обликом объекта (требования, конфигурация и т. д.);
- аккумулирования документов/данных для сертификации и передачи в эксплуатацию (*commissioning* и *handover*) также нескольким организациям.

Штат самой *Cross Rail* составляет около 300 человек, организованы подразделения управления требованиями, конфигурацией, создаваемой транспортной системой в целом, документами, поставками и т. д., которые реализуют соответствующие функции.

Основные проблемы проектной программы не технические — тоннели, станции, подвижной состав, автоматика и т. п. не представляют собой ничего нового. Проблемы находятся в области организации проектной программы в целом, координации исполнителей, взаимодействия с регуляторами, финансирующими организациями, аудиторами, будущими владельцами — эксплуатирующими организациями, а также в организации 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 увеличивает 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 информационной модели (ИМ) продукта и т. д. Кроме роста числа компаний, бизнесом которых являются инженерные услуги (это было и ранее), появляются 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 — 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 и 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 — сами изделия/объекты/системы все больше становятся продуктами интеграции «стандартных» серийно выпускаемых компонентов (или услуг);
- происходит дальнейшая глобализация. Становятся глобальными не только цепочки поставщиков (например, уже сейчас *Boeing* более 50% компонентов получает от зарубежных поставщиков), но и процесс создания нового продукта — самая суть бизнеса;
- 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 и стимулируют изменения в технологиях ОУП.

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

- полноценного создания и манипулирования информационной моделью продукта на всем его жизненном цикле параллельно с манипулированием физически существующим продуктом, в том числе на изготовление, сертификацию, модернизацию продукта производства;
- специальных возможностей эффективного включения в ИМ продукта стандартных серийно выпускаемых компонентов (или услуг), а также компонентов других поставщиков;
- 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;
- специальных возможностей использования в ИМ ранее разработанных технических, типовых, референтных решений (для облегчения сертификации, массовой кастомизации);
- эффективного и унифицированного информационного интерфейса в формате полной ИМ между всеми производственными единицами, в том числе в логике интерфейса с «производственным облаком».

Смежные сферы, затрагиваемые технологиями ОУП, и условия развития

Технологии ОУП связаны с научными исследованиями в области менеджмента и экономики, подготовкой кадров, 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, защитой компьютерных инфраструктур, перспективными средствами и программными системами защиты данных, языками и системами программирования.

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

- 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 в области исследований и разработки современных технологий ОУП;
- включение современных технологий ОУП в интегрированные технологические цепочки.

Барьеры развития технологий ОУП

Технологии ОУП считаются «мягкой» организационной областью, что обуславливает характер барьеров внедрения. К основным барьерам относятся:

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

Вместе с тем барьеры обуславливают возможности внедрения современных технологий ОУП:

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

Масштаб влияния

Современные технологии ОУП, как было отмечено выше, являются решающим фактором в соблюдении ритмичности производства, плановых сроков, снижении себестоимости, улучшении качества изделий и работ.

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

Эффект от внедрения технологий ОУП может быть весьма существенным, например, по оценкам отчета [55], внедрение процедур ОУП приводит к снижению количества неуспешных проектов на 15%, проектов с перерасходом бюджета — на 10, повышению производительности при выполнении 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 табл. 4. Таблица 4 позволяет сделать вывод, что перспективные технологии ОУП в России находятся на самом начальном уровне, что показывает наличие резервов эффективности и создает значительные возможности для развития: эти технологии имеет смысл внедрять практически на всех промышленных предприятиях.

Таблица 4. Текущий статус использования технологий ОУП в России

Подходы и методы ОУП	Текущий статус
1	2
Системно-инженерные подходы: • Концепции <i>PLM</i>, 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 их большинстве они сложились стихийно и не являются эффективными. В отдельных случаях процессы стандартизированы и доведены до уровней, соответствующих международным практикам. Неизвестны факты использования концепции полезности или себестоимости на всем ЖЦ. На практике промышленные предприятия не имеют адекватных компетенций и систем учета себестоимости продукции. Себестоимость рассчитывается, но при этом не учитываются все необходимые факторы, в том числе затраты на НИР или производственные затраты внутри цехов (соответственно и предприятия в целом) не разносятся на изделия / линии изделий. Есть отдельные попытки начать использовать подходы управления сроком эксплуатации капитальных объектов (<i>Plant Life Management</i>) на уровне разработки концепций
Модульность, платформы, крупноблочная сборка и монтаж	Платформы используются, крупноблочная сборка не используется

Продолжение табл. 4

1	2
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. Крайне редко ИМ используется и смежными предприятиями
Управление проектными программами и проектами, <i>EVM</i> и <i>IPD</i>	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
Расширенное предприятие, интеграция данных и процессов (<i>interoperability</i>)	Неизвестны факты реализации концепции «расширенного предприятия». На отдельных предприятиях внедрены единые процессы с отдельными смежниками. Интеграция инженерных данных практически отсутствует, известны единичные случаи передачи неполной электронной модели между организациями и подразделениями внутри организаций
Стандарты представления данных и информационного обмена <i>OWL</i> , <i>STEP NC</i> , <i>ISO 15926</i>	Известны единичные случаи внедрения стандартов обмена данными. По <i>ISO 15926</i> ведутся отдельные работы тремя-пятью небольшими группами энтузиастов, крупные предприятия редко заказывают НИР в данной области
<i>TQM</i> , <i>LEAN</i> и др.	<i>LEAN</i> достаточно популярен, есть несколько консалтинговых фирм, реализовавших десятки проектов внедрения <i>LEAN</i> на промышленных предприятиях
Безбумажный документооборот. Управление <i>online</i> .	Неизвестны факты внедрения ни полномасштабного безбумажного документооборота в промышленности, ни организационно-распорядительного, ни технического; аналогично и электронных архивов проектно-конструкторской документации

1	2
	Управление производством <i>online</i> реализовано в рамках отдельных цехов, о фактах внедрения такого управления в рамках всего предприятия или тем более кооперации неизвестно
<i>Manufacturing intelligence, Industry 4.0, Smart Manufacturing; Global Product Development; Virtual Enterprise</i> и альянсы; «производство как сервис» и «облачное производство»; инфраструктура «облачного производства» — <i>Industrial Interne</i>	Факты участия промышленных предприятий в разработке или заказы НИР по данным направлениям неизвестны
Отделение и аккумулятивное неимущественных функций: маркетинг, концепт/требования, архитектура, кооперация, сертификация, продажи, сервис	Факты аккумулятивного неимущественных функций «вдоль всего ЖЦ» неизвестны. Повсеместное отделение проектных институтов и/или КБ от заводов и других производственных предприятий (как историческое наследие) является выделением некоторых функций на определенном этапе ЖЦ («поперек», а не «вдоль» ЖЦ), что на практике создает барьеры между организациями и, таким образом, противоречит тренду

Источник: Составлено авторами.

Основываясь на оценках [55] или [56], 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 много информационных систем (например, *ERP*-системы в различном составе внедрены практически на всех значимых предприятиях, почти

на всех рабочих местах проектировщиков и конструкторов большинства предприятий установлены САХ-системы и т. д.). Российские предприятия широко используют те же самые программные и технические средства, что и зарубежные предприятия. Большинство сегментов информационно-технологических рынков Российской Федерации обеспечивается поставками общемировых вендоров, например:

- *CAD, CAM, CAE, PDM* — платформы уровня крупного предприятия и др.;
- *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 модернизации предприятий в подавляющем большинстве случаев на первое место ставили 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 дополнительных программных средств, сколько на организационных изменениях — новых регламентах взаимодействия, информационном обмене и т. д.

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

- 1) адаптацию методик и подходов ОУП к специфике предприятия и производственного контекста, окружающего предприятие;
- 2) создание новых моделей производственных и бизнес-процессов, реализующих новые технологии ОУП;

- 3) разработку на основе моделей регламентов и инструкций для сотрудников, а также требований к информационным системам, поддерживающим новые производственные и бизнес-процессы;
- 4) реализацию требований к информационным системам, включая модернизацию существующих систем, внедрение новых, интеграцию и т. д.;
- 5) обучение сотрудников работе в рамках новых производственных и бизнес-процессов.

2.2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В этом разделе будут использованы распространенные 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 для создания продуктов.

CAE — Computer-Aided Engineering: использование 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 т. д.

MCAD — Mechanical Computer-Aided Design: *CAD* для разработки механических компонентов продуктов.

AEC CAD — Architecture, Engineering, And 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 (начальных стадий жизненного цикла), в особенности сложных и высокотехнологичных, для которых компьютерный дизайн практически единственный способ разработки. Например, современные микросхемы с миллиардами транзисторов были бы невозможны без развития в 1970–1980-х гг. компьютерных средств проектирования, моделирования, оптимизации и тестирования, которые, в свою очередь, основаны на прогрессе фундаментальных алгоритмических исследований в нескольких областях.

На рис. 7 системы *CAD/CAE* поддерживают создание *3D* геометрической структуры (*CAD*) и расчетных моделей (*CAE*), а также функциональных моделей и являются основными средствами создания данных о продуктах, в дальнейшем используемых всеми системами организации и управления производством.

Системы для дизайна механических систем (*MCAD*, машиностроительный *САПР*) в отличие от систем проектирования электроники (*EDA*) должны поддерживать разработку намного более разнообразных изделий с помощью технологий. Еще более существенна проблема разработки систем для мультидисциплинарного проектирования, позволяющих 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%. При

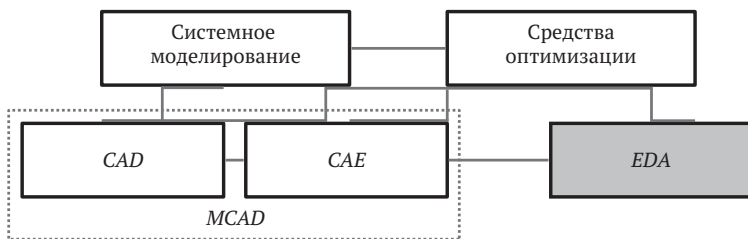


Рис. 7. Основные группы технологий проектирования продуктов

этом лишь 28% участников опроса используют моделирование, включающее средства CAE (выборка 409 компаний — пользователей технологий CAD, распределенных по различным регионам и областям деятельности) (рис. 8).

Дальнейшее развитие и необходимость принципиально новых подходов к САХ в современных условиях обуславливают несколько факторов:

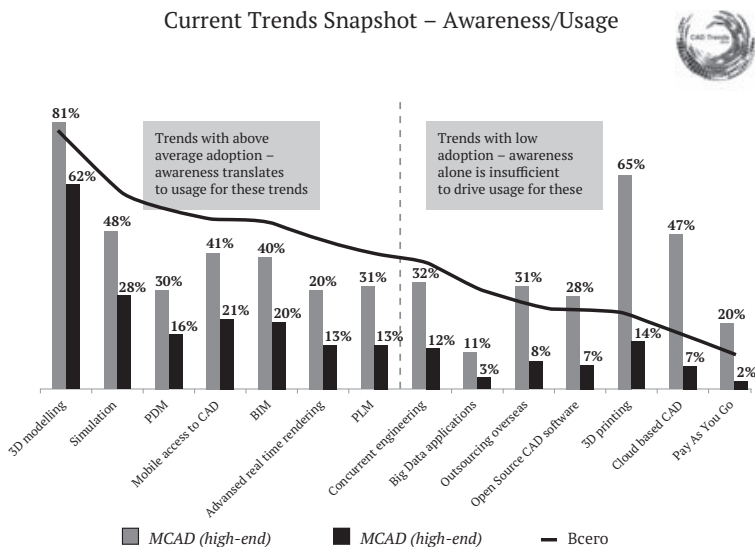


Рис. 8. Уровень внедрения CAD- и CAE-технологий, по данным компании Business Advantage

Источник: [57].

- индивидуализация и повышение скорости разработки новых продуктов и новых версий продуктов требуют 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/CAE/CAM*;
- распределенное производство и повышение гибкости производственных цепочек требуют существенного увеличения количества работников с компетенциями в области компьютерного дизайна, что возможно только при «демократизации» существующих систем с точки зрения необходимого специализированного уровня подготовки пользователей;
- поддержка на всех этапах разработки продуктов удаленного совместного дизайна;
- необходимость адаптации к новым технологиям (в частности, к аддитивным технологиям и технологиям с использованием современных материалов).

Мы рассматриваем прежде всего средства *MCAD*, наиболее близко связанные с производственными технологиями, исключая программное обеспечение *AEC* (архитектуры и строительства) и в основном *EDA*. Хотя дизайн электронных компонент 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 на двухмерных чертежах, но довольно быстро практически все ведущие системы перешли к работе с трех-

мерными моделями изделий, из которых можно было сгенерировать двухмерные проекции для производственной документации.

Главная 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 трехмерных 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)* включают 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 служат 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 индустрии развлечений и тренажерах) популярны так называемые поверхности подразделения (*sub-division 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 распространен 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, передвигать или изменять 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 (*computer-aided engineering*). После разработки геометрических моделей можно либо напрямую переходить к созданию и 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, так как 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: металла, пластиков, композиционных материалов и т. д.

Моделирование динамики систем твердых тел (*rigid body dynamics*). Моделирование сложных механических систем с большим количеством движущихся элементов (например, мани-

пуляторов 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 (например, 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. Так как теплообмен часто тесно связан с механическими нагрузками, современные системы теплового анализа, как правило, интегрированы с системами анализа механических свойств. Вместе с тем 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 считается нахождение компромисса между различными требованиями к продукту при минимизации затрат на изготовление, эксплуатацию и обслуживание. Средства автоматической оптимизации, в том числе многокритериальной и междисциплинарной, 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 от концептуального дизайна 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, потоков жидкости и электрических полей, основана на *методе конечных элементов* — математическом подходе к моделированию физических процессов и решению 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 образовались путем поглощения конкурентов. «Большая четверка» компаний включает в порядке убывания объема продаж за 2012 г.:

- Dassault Systemes (France/USA) — 2614,0 млн долл.;

- *Autodesk* (USA) — 2312,2 млн долл.;
- *Siemens PLM* (Germany/USA) — 1768,4 млн долл.;
- *PTC* (USA) — 1257,2 млн долл.

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

- *ANSYS* (USA) — 798 млн долл.;
- *Altair Engineering* (USA) — 240 млн долл.;
- *MSC* (USA) 188,6 млн долл.

Отдельно стоит отметить компанию *Mathworks* (объем продаж — 760 млн долл.), 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 *CAM*, в отличие от *PLM/CAD/CAE*, характеризуется отсутствием консолидации (хотя в 2013 г. началась и в 2014 г. активно продолжилась консолидация) 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 этой 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 перечисленных ведущих компаний имеет продукты во всех основных категориях *CAD* и *CAE*, их стратегии развития существенно различаются. Анализ недавних приоб-

ретений и новых продуктов этих компаний хорошо отражает современное состояние области и текущие тенденции ее развития в целом.

Dassault Systemes

Dassault Systemes — крупнейшая компания на рынке. Линейка продуктов *Dassault* включает несколько 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), *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 г. 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 популярности прямого моделирования.

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* — изучение всех процессов клиента и разра-

ботка решений, нацеленных на полную поддержку этих процессов.

К развитию в этой области относится приобретение компании *Netvibes* в 2012 г., разрабатывающей средства мониторинга и анализа социальных сетей, и компании *RTT* в 2014 г., 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 г., хотя по абсолютным цифрам лидировал *CAD* высокого уровня (*CATIA*).

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

Создание новых направлений, расширяющих клиентскую базу Dassault Systemes и требующих принципиально новых подходов: продукты *GEOVIA* (2012), основанные на продуктах приобретенной в 2012 г. 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 г. была приобретена компания *Simulayt* (проектирование и анализ изделий из композиционных материалов), в 2013 г. — *Simpoe* (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 яв-

ляется одним из приоритетов *Dassault Systemes*, как и поддержка моделиориентированных системно-инженерных процессов, прежде всего *Dymola*. Можно ожидать дальнейшего развития программных средств для системной инженерии.

Autodesk

По структуре 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 разнообразному набору продуктов, доступным ценам на многие из них и ориентации 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 различаются. 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 (это мы обсудим ниже).

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*, нацелен на сходный диапазон потребителей по цене.

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, проектирование высококачественных поверхностей для автомобилестроения), конкурентные преимущества которых связаны с их корнями, уходящими в продукты для индустрии развлечений.

Относительно недавно появился комплекс «облачных» продуктов 360, который подробнее будет рассмотрен 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 развития: «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. повышением доступности средств *CAD/CAE* как по цене, так и по требуемому уровню подготовки пользователей [58]. CEO *Autodesk* Карл Басс в интервью *engineering.com* охарактеризовал 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 многих людей или фирм. Мы предоставляем инструменты, необходимые для координации и сотрудничества» [59].

Линия продуктов 360 включает 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 системами того же направления, скажем, от *Dassault* или самого *AutoCAD* [59].

Расширение поддержки моделирования. Анализ недавних приобретений компании *Autodesk* показывает, что развитие ее возможностей 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 недавними приобретениями выступают: *Blue Ridge Numerics* (2011, вычислительная гидродинамика), *Firehole Technologies* (2013, композиционные материалы) и компания *NEI Software* в 2014, являющаяся одной из ведущих в области *CAE* (например, продукт *NEI Nastran*, который существенно приблизил *Autodesk* к лидерам в 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 млрд 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 *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 механика, *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 включении в наши продукты] последней модной технологической новинки, а, скорее, в том, каково место этих технологий в производственных процессах наших клиентов, позволят ли они 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*)» [60]. 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* являются приоритет многоплатформенных и *multi-CAD*-систем, поддерживающих не только импорт из конкурирующих систем CAD, но и интеграцию с 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 [61]. Другое приобретение — компания *Vistagy* (2011, дизайн и моделирование изделий из композиционных материалов).

PTC

Последняя компания «большой четверки» существенно уступает остальным трем по объему продаж. Исторически компания *PTC* разработала концепцию параметрического моделирования, которая долгое время была основной для всех ведущих компаний. 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)* *Servilgistics* 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 *TechClarity* (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 соответствующее решение» [62].

Практически все недавние приобретения компании *PTC* — в области *PLM*, *SLM* и *ALM* (*Servigistics*, *Enigma*, *Atego*), что согласуется с заявленными компанией приоритетами. Приобретение компании *Atego*, в частности производящей программное обеспечение для поддержки моделиориентированной 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* [61], *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, в области *CAE* есть несколько специализированных компаний, играющих крайне важную роль, в особенности компания *ANSYS* (рис. 9).

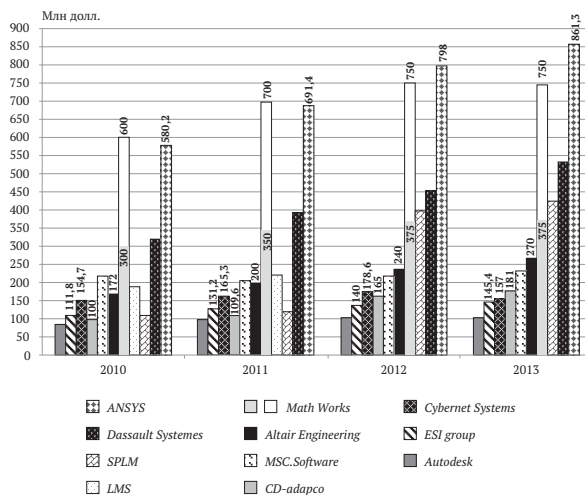


Рис. 9. Лидеры рынка CAE в 2010–2013 гг.

Источник: [61].

ANSYS

Продукты компании ANSYS включают 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 задач. Интеграционная платформа *ANSYS Workbench* поддерживает интеграцию с многочисленными системами CAD, модификации и создания (ручного и автоматического) геометрических моделей и сеток, параметрического анализа и оптимизации, системного моделирования. Отдельная группа продуктов предназначена для использования в масштабных вычислениях 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 добавляют средства поддержки системной инженерии к продуктам компании ANSYS, что расширяет диапазон потенциальных клиентов компании. Другие приобретения включают *EVEN* (*Evolutionary Engineering AG*), небольшую компанию, разрабатывающую систему анализа и оптимизации композиционных 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* — продукт 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. Одна из основных черт компании *Altair*, делающая ее продукты уникальными, — долговременный приоритет автоматической оптимизации формы (продукт *OptiStruct* существует более 20 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 композиционных 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, разработавшая 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.

Компания выпускает 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* (поддержка 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 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, увеличение максимального количества конечных элементов в 250 раз — до 0,25 млрд, интеграция оптимизации и открытие интерфейсов для программных средств других компаний [62].

Другие компании

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

Другое важное событие — приобретение компанией *3D Systems* крупнейшей на рынке аддитивных технологий компании *Geomagic*. Незадолго до этого *Geomagic* купила компанию

Alibre, производящую систему *MCAD*, которая уступает по числу пользователей только *Solidworks*, принадлежащей *Dassault Systemes*.

Также интересен пример компании *ZWCAD* (Китай, с R&D в США). Хотя линейка продуктов компании существенно уступает продуктам «большой четверки» благодаря тому, что в 2013 г. Министерство промышленности и информационных технологий Китая рекомендовало *ZWCAD* 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, 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 композиционных 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, так как уже не приходится ожидать, что интерпретировать результаты будет 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, про-

двинутые средства оптимизации, интегрированные с CAE, стали появляться в продуктах других компаний сравнительно недавно и можно ожидать усиления 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 крупные компании занимают более осторожную позицию, хотя и они 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 и включению модели «программное обеспечение как услуга» в качестве одного из вариантов продаж. Следует отметить, что пока неясно, 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 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 компонентов.

Поддержка системно-инженерных подходов. Хотя шаги в этом направлении сделаны 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, неосновных 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 данной области, так как 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 г., по оценкам компании IDC, составил 162 млн долл., 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 млрд долл.), значительно меньшую по отношению к ВВП или объему производства, чем в развитых странах. Это свидетельствует, с одной стороны, о существенных возможностях роста, но с другой стороны, о низком интересе 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 — более 8500 клиентов, оборот — 983 млн руб. в 2013 г.; по информации компании, ее доля российского рынка CAD составляет 15–20% [63]. Основные продукты — средства MCAD КОМПАС-3D, КОМПАС-График, ядро C3D, система PDM ЛОЦМАН: PLM — самая крупная из российских компаний в этой области. Отличительной особенностью продуктов АСКОН является собственное геометрическое ядро C3D, доступное для лицензирования (лицензировано примерно десятью российскими и зарубежными компаниями — разработчиками CAx). Компания не разрабатывает

средства CAE (поддерживается интеграция с продуктами НТЦ АПМ), но имеет полную линейку средств *PLM*, *PDM* и специализированных расширений основных продуктов. В стратегии развития продуктов и сервисов АСКОН заметен учет изменений как в производственных технологиях (цифровой жизненный цикл изделий, аддитивные технологии), так и в ИТ-трендах («облачные» вычисления, мобильность). За последние несколько лет АСКОН предложила потребителям КОМПАС-3D из «облака» (проект не нашел спроса среди российских предприятий).

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 на базе продуктов АСКОН.

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), средства CAD и PLM и специализированные решения. В целом по диапазону функций предложения *T-FLEX* близки к другим программам CAD, рассчитанным 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 российского геометрического ядра (РГЯ), финансируемой 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 разработ-

ки (преимущественно платных) специализированных приложений. В настоящее время доступно значительное количество таких приложений, например, для дизайна механизмов, электрической разводки, линий электропередачи и т. п.

Компании-производители средств CAE

Ряд компаний-производителей специализируются на средствах CAE, в частности НТЦ АПМ (*WinMachine*), компании *Fidesys*, *Tesis* и др.

Они получают значительную часть дохода от выполнения проектов моделирования изделий или конструкций по заказу и могут выступать как интеграторы программных продуктов международных компаний CAE (основная часть предложений *Tesis*).

Продукты компании НТЦ АПМ поддерживают интеграцию с продуктами компании АСКОН и включают продукты для основных типов физического моделирования: анализа деформаций и прочности, теплового анализа, механики твердых тел, течения жидкости и газа. Также поддерживается интеграция с продуктами CAD компании АСКОН.

Относительно недавно созданная компания *Fidesys* фокусируется на прочностном анализе, нацеленном на современные приложения (композиционные и другие сложные материалы, задачи геофизики, учет влияния дефектов и т. п.). Отличительной чертой продукта компании CAE *Fidesys* является включение в начальной стадии разработки современных подходов к задачам прочностного анализа и моделей материалов и деформаций, а также нацеленность на совместимость с основными системами CAD. Среди современных технологий, заложенных в систему: распараллеливание вычислений на всех стадиях анализа, использование спектральных элементов в дополнение к конечным, конечные элементы с разрывными базисными функциями (*discontinuous Galerkin method*) и надежные методы генерации сеток. Решения компании доступны в виде «облачного» сервиса.

Другие российские компании

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 взаимодействует с клиентами в различных областях, включая сотрудничество с *Airbus*.

Хотя в этом разделе мы не рассматривали в деталях состояние и перспективы развития средств *CAM*, следует отметить наличие в России компаний с высокими компетенциями по разработке систем *CAM* и с коммерческими конкурентоспособными продуктами в этой области. Наиболее известны и распространены среди российских промышленных предприятий-потребителей системы АДЕМ (компания АДЕМ), ГеММА (НТЦ «ГеММа», базируется в ЦАГИ), *SprutCAM* (компания «Спрут-Технология»).

Ряд зарубежных компаний (*Bricsys*, *TurboCAD*, *Mentor Graphics*) имеют 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. Дру-

гой пример — Саровский инженерный центр, сочетающий инженерные услуги и продажу продуктов CAE компании *CD-adapco*.

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

Рынок CAD в России растет быстрее, чем в развитых странах, 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 для крупных традиционных потребителей (например, автомобильных и авиационных компаний) с относительно длинными циклами разработки, большими отделами разработки новых продуктов, включающими группы специалистов по каждому этапу разработки продукта. Это связано прежде всего с доминирующей моделью бизнеса компаний «большой четверки», ориентирующихся на крупных клиентов (например, стоимость рабочего места *CATIA Dassault Systemes* варьирует от 10 тыс. до 60 тыс. долл. 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 CAE.

В то же 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 программных продуктов. Так, можно отметить упрощение интерфейсов пользователей, особенно для САЕ, изменение ценовой политики, в частности связанное с перемещением в «облако», расширение возможностей 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 и 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 независимо от национального контекста и максимизация эффекта от развития CAD требуют наличия следующих условий.

Стимулирование 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. Следует также отметить, что подобные проекты могут стимулировать интеграцию ПО разных поставщиков в увязанные технически, функционально и методически новые комплексные решения, которые затем поддерживаются и развиваются в качестве следующих версий коммерческих ИТ-продуктов, доступных другим промышленным потребителям.

Образование пользователей, поддержка внедрения. Продукты CAD и особенно САЕ требуют высокой подготовки пользо-

вателей, 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, нацеленной не только на обучение конечных пользователей отдельным элементам систем, но и на адаптацию производственных процессов к использованию средств САХ на всех уровнях.

Стандартизация — поддержка усилий по стандартизации форматов данных и технологий интеграции систем, поощрение выработки 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 данной области получается именно за счет разработки специализированных расширений существующих продуктов общего назначения, соответственно максимальное облегчение выхода на рынок таких расширений — ключевой элемент развития области.

Опережающие научные разработки. Необходима поддержка научно-исследовательских организаций и университетов, ведущих фундаментальные исследования в областях, связанных с САХ. 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: композиционных, наноматериалов, материалов, произведенных с помощью аддитивных технологий и биоматериалов. Например, локальная

конфигурация волокон композиционного материала может иметь критическое влияние на максимальные напряжения; в то же время невозможно моделирование полной структуры на уровне отдельных волокон. 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, 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, создающей 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, для интегрированного моделирования разнородных физических процессов и систем (механических, тепловых, электрических) необходима разработка новых представлений, данных и алгоритмов, например, для оптимизации формы предпочтительны алгоритмы, не требующие генерации сеток или минимизирующие ее. Другим важным направлением являются исследования по созданию новых типов пользовательских интерфейсов для интегрированных систем с целью упрощения изучения пространства возможных решений, а также снижения требований к квалификации пользователя.

Эффективные и надежные геометрические алгоритмы. Ведущие компании в области CAE в последнее время уделяли существенное внимание средствам геометрического моделирования, прежде всего связанным с построением сеток. В контексте оптимизации формы проблемы автоматического создания сеток, или использования CAD-геометрии напрямую (изогометрический анализ), имеют большое значение.

Статистические методы и методы машинного обучения для инженерных приложений, работа с большими объемами данных. Геометрическое и 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 создания моделей пониженной размерности. Этот тип подходов уже успешно разрабатывается компанией DATADVANCE.

Другой аспект работы с большими объемами данных — поиск геометрически подобных моделей, схожих или совпадающих с моделями, требующимися для новых разработок, сокращающих время проектирования или полностью устраняющих необходимость создания новых моделей в отдельных случаях. В отличие от текстового поиска поиск геометрии требует разработки новых технологий сравнения геометрических моделей. Эти технологии также необходимы для защиты интеллектуальной собственности. На мировом рынке только начинают появляться технологии данного класса

от ведущих производителей (*EXALEAD OnePart* от *Dassault Systemes*, *3DPartFinder* в *SolidWorks*). Компании АСКОН и ЛЕДАС имеют свои технологические разработки в этой области: *Pilot-ICE* и *LGC*.

Моделирование редких событий. Во многих задачах проектирования следует 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 предназначены преимущественно 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, адаптации мебели к помещению либо одежды или обуви к потребителю. Это требует разработки эффективных 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 измере-

ний в проектировании, — так называемая ассимиляция данных, т. е. разработка систематических подходов к адаптации вычислительной модели с включением в 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, 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 могут 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 на год общее время, затраченное на разработку [64].

Для небольших компаний и стартапов: доступность интегрированных средств *CAx*, в частности ориентированных на пользователя, не обладающего компетенцией в определенной области, а также возможность использования открытых элементов дизайна существенным образом уменьшают риски и время разработки новых продуктов. Раньше небольшие компании пользовались преимущественно простейшими средствами *CAD*; последние инициативы Autodesk и других компаний по модели «программное обеспечение как услуга», а также *CAD*-стартапов, подобных *sunglass.io*, значительно расширяют 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 невозможно 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 считаются необходимой частью перестройки производственных процессов для повышения эффективности и гибкости производства.

2.2.7. Оценки перспектив для России

Возможности для производителей

1. *Поддержка российских стандартов, адаптация к специализированным требованиям российских потребителей.* На данный момент можно сказать, что это одно 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 создают 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. «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 увеличения 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 говорилось в предыдущих разделах, в конечном счете программное обеспечение лишь инструмент и определяющим фактором повышения эффективности считается 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, так как 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 компаний по нескольким причинам:

- несоответствие функционала «коробочного» программного обеспечения нуждам потребителей;
- 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 выше, помогают решить часть этих проблем (снижение стоимости, упрощение использования), но не решают задачи преодоления несоответствия нуждам потребителей и выработки планов изменения процессов.

2.3. ПРОМЫШЛЕННАЯ И СЕРВИСНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

2.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТИПОЛОГИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Цель настоящего раздела — 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):

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

Данный стандарт выделяет два основных класса роботов: промышленные и сервисные, среди последних — подклассы профессиональных и персональных роботов.

Стандарт дает следующие определения:

- промышленный робот — автоматически управляемый, перепрограммируемый многоцелевой манипулятор, программируемый в трех или более осях для использования в автоматизации промышленности, который либо зафиксирован в месте установки, либо имеет возможность перемещения;
- сервисный (профессиональный) робот выполняет полезные задачи для людей или оборудования, за исключением промышленных роботов.

Типология промышленной и сервисной робототехники имеет несколько измерений:

- A. По типу рынка, отрасли промышленности или хозяйства, применяющего робототехнические комплексы (РТК):
 - промышленная робототехника: автомобилестроение, сборка электроники, автозапчасти и т.д. по отраслям индустрии;
 - сервисная (профессиональная) робототехника: полевая робототехника, в том числе полеводческая, животноводческая, деревообрабатывающая и т.д. Профессиональная уборка. Мониторинг и наблюдение за объектами. Строительство и снос зданий. Логистика и транспорт и т.д.
- B. В зависимости от области применения: наземные, воздушные, морские (надводные, подводные), космические РТК.
- C. В зависимости от физической формы РТК: манипуляторы, робототехнические платформы, экзоскелеты, метаморфные и антропоморфные РТК, нано- и микро-роботы.
- D. В зависимости от степени автономности управления: программируемые, телеуправляемые, супервизорные, коллаборативные, автономные РТК.

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 1896 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 [65].

Различные частные организации и государственные ведомства проводят большую аналитическую работу по сбору

данных и прогнозированию развития отрасли робототехники. В табл. 5 собраны важнейшие экономические прогнозы развития отрасли робототехники.

Таблица 5. Важнейшие прогнозы отрасли робототехники

Прогноз	Оценка, млрд долл.
Общее влияние робототехники на мировую экономику к 2025 г. [66]	5270
Мировой рынок всех видов робототехники и программного обеспечения к 2020 г. [67]	151
Мировой рынок индустриальной робототехники к 2020 г. (двукратный рост по отношению к 2013 г.) [68]	75
Размер рынка робототехники в Японии к 2020 г. по плану К. Абе [69]	25
Рынок беспилотных летательных аппаратов к 2020 г. [70]	12
Рынок сервисной робототехники к 2020 г. [71]	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 служит 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 *Filips* в Дании, использующая современные промышленные роботы, имеет численность рабочих в 10 раз меньшую, чем аналогичная фабрика в Китае, имеющая сопоставимый объем выпуска продукции.

Основной причиной увеличения производительности труда при массовом использовании роботов считается повышение коэффициента использования оборудования за счет со-

кращения 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 уменьшает общую энергоемкость производства, так как для установки РТК требуется помещение меньшей площади. Также помещение, в котором размещаются РТК и не требуется постоянное присутствие людей, может иметь более низкий уровень освещения и отопления.

Во-вторых — повышение среднего возраста трудоспособного населения в развитых странах. Например, средний возраст мужчин в Японии — 46 лет. Компания *BMW* ожидает, что к 2020 г. 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 *BMW* рабочие управляют операцией очистки тяжелых литейных форм с помощью мощных манипуляторов *KUKA*. Среди причин внедрения автоматизации этого процесса *BMW* называет именно увеличение среднего возраста работников. 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 позволяет распределить поставки промышленных роботов по отраслям. На рис. 10 видно, что лидерами по использованию промышленных роботов выступают такие отрасли, как автомобилестроение и производство электроники.

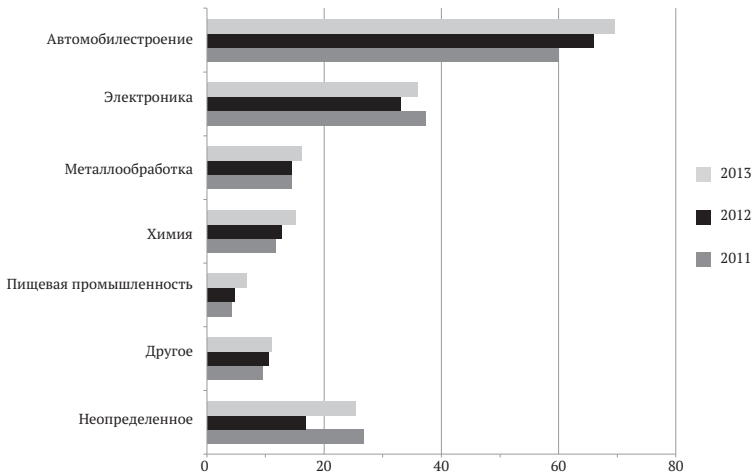


Рис. 10. Объем продаж роботов по секторам промышленности в 2011–2013 гг., тыс.

Источник: [71].

Рисунок 11 демонстрирует, что промышленные роботы активно применяются во всех видах производств, но лидирующей отраслью по средней плотности роботов стало автомобилестроение.

Согласно [72], насыщенность роботами производства электроники и бытовой техники возросла почти в 3 раза по сравнению с 2009 г. Низкая стоимость рабочей силы в странах Азии перестает быть конкурентным преимуществом, что вызывает трансформацию производства азиатских сборочных компаний. Например, заключено соглашение между компаниями

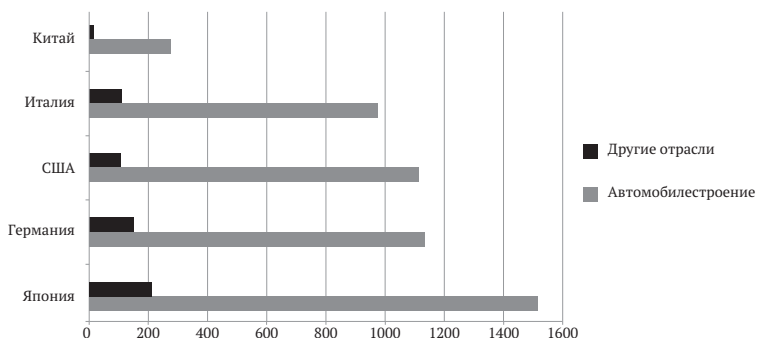


Рис. 11. Сравнение плотности роботов (число роботов на 10 тыс. работающих) в автомобилестроении и других отраслях производства в некоторых странах

Источник: [71].

Apple и *Foxconn* об инвестициях в роботизацию производства тайваньского производителя в размере около 7 млрд долл. [73]. Основным поставщиком оборудования по этому соглашению является японский производитель робототехники *FANUC*.

На рис. 12 показано распределение роботов по странам.

В 2013 г. среднемировой уровень роботизации составлял 62 робота на 10 тыс. работающих, для стран Европы этот показатель был равен 82, для Северной Америки — 111, для Азии и Австралии — 51 работ. Для Китая уровень плотности про-

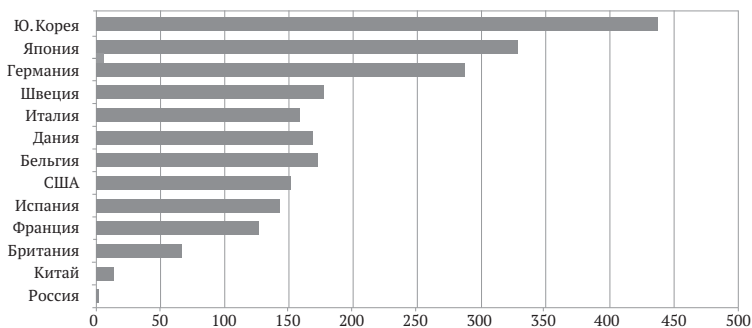


Рис. 12. Количество используемых роботов на 10000 занятых в производстве по избранным странам

мышленных роботов составлял 30 роботов на 10 тыс. работающих в промышленности, а для России — 2 робота на 10 тыс.

Рисунок 13 отражает региональное распределение продаж промышленных роботов в 2013 г. В Тихоокеанский регион ежегодно поставляется больше роботов, чем в Европу и Америку, вместе взятые.

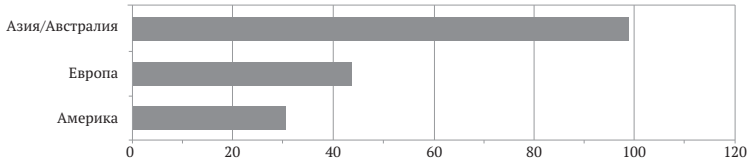


Рис. 13. Продажи промышленных роботов в зависимости от региона в 2013 г., тыс. шт.

Рисунок 14 иллюстрирует региональное распределение продаж сервисных роботов. Региональные отличия продаж сервисных роботов от промышленных объясняются тем, что промышленное производство в Китае еще не окончило фазу роста и собственники производства фокусируются на максимальной автоматизации процессов, которая уже доказала привлекательность с точки зрения вложения средств.

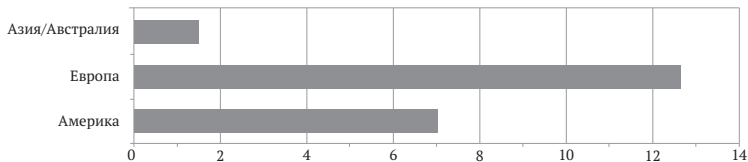


Рис. 14. Продажи сервисных роботов в зависимости от региона в 2013 г., тыс. шт.

По оценкам МФР [71], с 1998 г. в мире было разработано, продано и задействовано около 150 тыс. 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 (рис. 15).

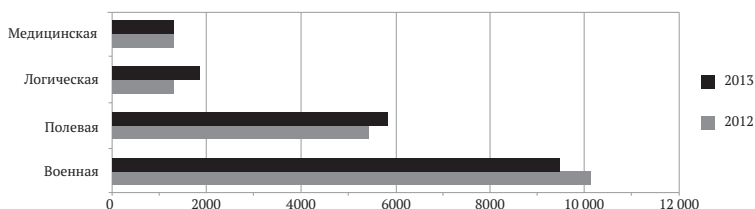


Рис. 15. Поставки сервисных роботов по областям применения в 2012–2013 гг., шт.

Источник: [71].

Таблица 6 содержит сводные цифры по робототехнике.

Таблица 6. Ключевые индикаторы отрасли робототехники в 2013 г.

Показатель	Значение
Число проданных промышленных роботов	179 тыс. шт.
Число проданных сервисных роботов (в том числе военных — 45%)	21 тыс. шт.
Мировой рынок промышленной робототехники	29 млрд долл.
Мировой рынок сервисной робототехники	3,57 млрд долл.
Общее количество инсталляций промышленных роботов	До 1,6 млн шт.
Общее количество произведенных сервисных роботов	До 150 тыс. шт.

Источник: [71].

В табл. 7 приведены сведения о крупнейших мировых производителях робототехники.

Таблица 7. Крупнейшие мировые компании-производители промышленных роботов

Компания	Краткое описание
1	2
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 секторах промышленности, транспорта и связи

1	2
<i>Rockwell Automation</i> , США	Ведущий американский производитель микроконтроллеров и средств промышленной автоматизации, электрооборудования и программного обеспечения
<i>FANUC</i> , Япония	Японская компания — производитель ЧПУ, систем промышленной автоматизации, а также промышленных роботов. Название компании представляет собой акроним от <i>Factory Automation NUMerical Control</i> («Автоматизация технологических процессов и числовое управление»). Деятельность компании <i>FANUC</i> сосредоточена в трех сферах: станки, лазерное оборудование, промышленные роботы
<i>KUKA</i> , Германия	Немецкая компания — производитель промышленных роботов. Компания заявляет, что считается одним из трех ведущих поставщиков промышленных роботов для автомобильной промышленности на мировом рынке и ведущим поставщиком на европейском. <i>KUKA</i> имеет 25 дочерних компаний в Соединенных Штатах Америки, Мексике, Бразилии, Японии, Китае, Корее, Тайване, Индии и почти во всех европейских странах, главным образом это филиалы по продажам и обслуживанию
<i>ABB</i> , Швеция	<i>Asea Brown Boveri Ltd.</i> — шведско-швейцарская компания, специализирующаяся в области электротехники, энергетического машиностроения и информационных технологий. Основана в 1988 г. слиянием шведской компании <i>ASEA</i> и швейцарской <i>Brown, Boveri & Cie</i> . Офисы концерна представлены в более 100 странах мира
<i>Yaskawa Motoman</i> , Япония	Американский филиал японской компании <i>Yaskawa Electric Corporation</i> , ведущего мирового производителя инверторов, сервоприводов, контроллеров и промышленных роботов. Основанная в 1915 г., <i>Yaskawa</i> была пионером в управлении движением и в производстве приводной техники, запуске инновационных продуктов, которые оптимизируют производительность и эффективность машин и систем. Продукты и решения <i>Yaskawa</i> помогают управлять автоматизацией процессов в различных отраслях промышленности, таких как горнодобывающая, сталелитейная, станочная, автомобильная, упаковочная, деревообрабатывающая, текстильная, полупроводниковая и др.

Промышленная робототехника в Китае

Китай стал основным рынком сбыта для промышленных роботов: в 2013 г. 20% годовых продаж промышленных роботов (почти 37 тыс.) приходилось на КНР (рис. 16). Полное число используемых роботов в китайской промышленности достигло 133 тыс. шт. (в том числе около 10 тыс. роботов, установленных на заводах тайваньской компании *Foxconn* в Китае). МФР [71] 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 был и будет основным потребителем промышленной робототехники.

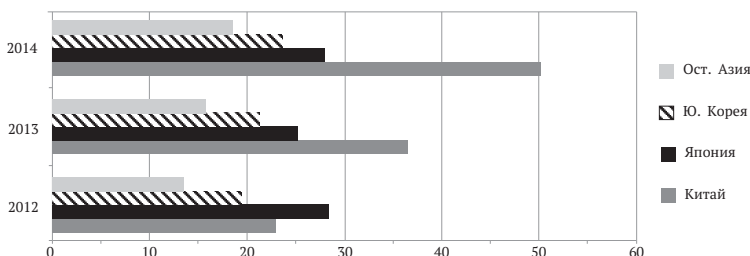


Рис. 16. Годовые поставки промышленных роботов в Азии, по данным МФР 2014 г., тыс. шт.

Источник: [71].

Основная причина этого — снижение производственных издержек и повышение производительности труда. Так, по данным [74], 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 (рис. 17).

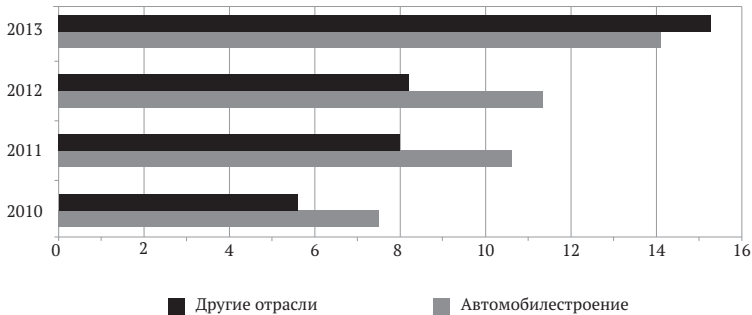


Рис. 17. Годовые продажи промышленных роботов по отраслям производства в Китае, тыс. шт.

Рост использования робототехники в других секторах также присутствует, но общее значение плотности роботизации в Китае все еще почти в 4 раза уступает среднемировому, оставляя место для роста.

Очень важным фактором становится то, что каждый третий робот, проданный в Китае в 2013 г., был произведен также в Китае [71].

2.3.4. ТЕКУЩЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ И СЕРВИСНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ЗА РУБЕЖОМ

Совместное использование роботов и людей, гибкие производственные ячейки

Данные предыдущих разделов свидетельствуют о том, что роботы массово используются практически во всех отраслях, что делает возможной 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* [75],

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) выступает концепция гибкого производственного модуля (ГПМ, *cell manufacturing/production system*) [76]. Согласно концепции ГПМ, производственный модуль — самодостаточное подразделение производства, на которое возложена ответственность за значительную часть создания готовой детали. ГПМ имеет в составе все необходимые станки, включая роботов, которые должны иметь возможность исполнять различные операции, включая автоматическую смену рабочего инструмента. ГПМ может дополняться концепциями «Индустрия 4.0» и «Промышленный Интернет» за счет связи реального производства и виртуальной реальности. «Промышленный Интернет» в свою очередь делает возможным получение телеметрии в ходе производственных операций в режиме онлайн и выполнение необходимых корректировок производственных процессов.

Примером такого производства может служить автозавод *Tesla* [77] 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 делает возможной перенастройку производства или отдельных линий в оперативном режиме при необходимости изменения конфигурации изделий.

Европейский исследовательский проект консорциума из 18 университетов и промышленных предприятий «Завод за один день» (*Factory-in-a-Day*) [78] имеет целью максимальное сокращение (в перспективе до нуля) первоначальных затрат малых и средних предприятий по оснащению 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 пригодных 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 стандартов, в частности *Machinery Directive* и *Low Voltage Directive* [79]. Таким роботам не нужна специальная зона безопасности, так как они обладают рядом сенсоров обычно на основе дешевых ультразвуковых сонаров, позволяющих определить наличие посторонних объектов рядом с роботом. Общий класс 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 на малых предприятиях. В частности, робот *Baxter* имеет стоимость владения менее 1 долл. в час из расчета использования круглые сутки 6 дней в неделю в течение трех лет [80]. Сокращение затрат предприятий на рабочую силу и повышение производительности труда (производство большего количества продукции с меньшим количеством усилий) считаются основным экономическим драйвером такого проникновения. Однако во многих исследованных бизнес-кейсах упоминается также повышение «эластичности» производственных мощностей за счет гибкой адаптации при сезонных или экономических изменениях спроса на продукцию.

Активно идет также разработка интуитивно понятных пользователям систем управления промышленными РТК, упрощающих первоначальную установку 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-Play* [81].

Примеры зарубежных проектов в области промышленной и сервисной робототехники

Интеграция решений: Universal Robot и Schunk

Датская компания *Universal Robot* — один из новых игроков на рынке промышленной автоматизации и робототехники, она основана в 2003 г. Получив в 2008 г. поддержку от государства в виде инвестиций в размере 1,34 млн долл., 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 восьмью 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 г. Стоимость робота составляет 22 тыс. долл. 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 метода. 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 ультразвуковые датчики, передающие сигналы о близко стоящих 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 без 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.

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

Промышленными ко-роботами, имеющими два манипулятора, занимаются и другие компании. Не так давно лидер рынка промышленной робототехники шведская компания *ABB* представила пилотный образец двурукого робота «Юми» — *Dual Arm Concept Robot*, 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 видеоизображения, которые делают нахождение людей рядом с роботом полностью безопасным. Компания планирует начать продажи этого робота в апреле 2015 г.

*Роботизированные горнотранспортные комплексы
и проект компании Rio Tinto «Mine of the Future»*

Разработка и внедрение в добывающий процесс роботизированных горнотранспортных комплексов (ГТК) и в целом автоматизация горнодобывающих работ для максимизации операционной эффективности производств считаются важнейшим приоритетом стратегического развития мировых лидеров отрасли добычи — *BHP Billiton*, *Rio Tinto* и др. По оценкам исследователей [82] 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 становятся [83]:

- сокращение затрат до 10% за счет высвобождения и переквалификации рабочей силы;
- 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 без деления на смены по 8 часов. Сокращение затрат может достигать 12%;
- уменьшение износа шин (до 12%);

- повышение безопасности 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 отраслей [84];
- возможность сократить капитальные затраты на строительство социальной инфраструктуры при *Greenfield*-проектах — проектировании разработки новых месторождений, к примеру Эльгинского угольного комплекса или других (можно построить поселок с инфраструктурой не на 5000 человек, а на 500). Некоторые аналитики указывают, что такое жилье может стоить до 1 млн долл. США на рабочего;
- возможность вести горные работы, когда присутствие людей запрещено регулирующими органами (крутые борта карьеров, ограничение на работу людей, большая эффективность ведения открытых горных работ, нежели подземных).

Программа *Rio Tinto «Mine of the Future»* поэтапно реализуется с 2008 г. совместно с производителем тяжелой техники *Komatsu* и рядом других вендоров [85]. На первом этапе был реализован проект *AutoHaul™* по полной автономизации грузового поезда частной железнодорожной линии *Rio Tinto* общей длиной примерно 1300 км. Стоимость проекта составила 518 млн долл. [86]. В 2010 г. был введен в строй центр операционного управления карьером Пилбара (одно из крупнейших мировых месторождений железной руды [86]) и начались испытания технологий автономных карьерных самосвалов и автоматизированных систем бурения. С 2012 г. началось промышленное внедрение автономных карьерных самосвалов (поставщик самосвалов — *Komatsu*). Все задействованные в проекте

машины работают в режиме автономного передвижения на основе *GPS/ГЛОНАСС*-навигации в дифференциальном режиме (точность позиционирования до 10 см) с помощью базовой (уточняющей) станции *GPS*. В настоящий момент в карьере Пилбара работают 53 автономных карьерных самосвала. В дальнейшем в проекте «*Mine of the Future*» их число будет доведено до 150.

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

- бортовые системы: комплекс управления движением самосвала (или другой техники) с помощью электро- и гидроприводов; комплекс автономной навигации включает 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 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 *SPARC* [87], подготовленный в рамках европейской программы *Horizon 2020*, использует кластерный подход к технологиям для определения основных направлений исследований в области промышленной и сервисной робототехники.

Выделяются четыре основных кластера технологий, которые могут произвольным образом комбинироваться:

- совершенствование методов разработки 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 относятся технологии коммуникации между центром управления и РТК или группой РТК.

По данным *The Robot Report*, в мире насчитывается 3065 организаций, деятельность которых можно напрямую отнести к созданию робототехники (рис. 18).

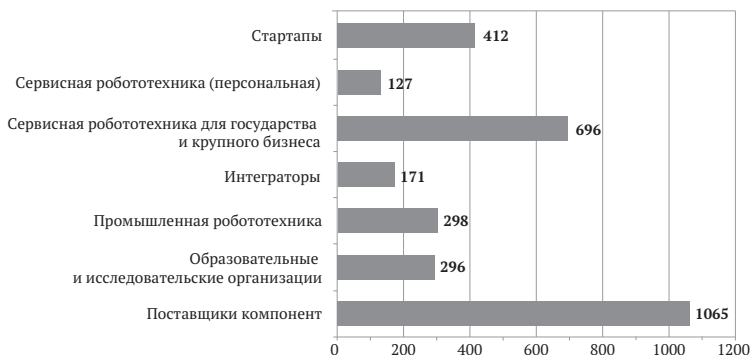


Рис. 18. Количество организаций, занимающихся робототехникой (октябрь, 2014)

Источник: [88].

На карте *Global Map*, представленной на сайте [88], 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 об их разработке) стратегические программы развития и поддержки национальных робототехнических отраслей. В табл. 8 собраны данные об основных известных национальных программах развития робототехнической отрасли.

2.3.6. Состояние российской промышленной и сервисной робототехники

По данным мониторинга МФР, в 2013 г. в российской промышленности было внедрено 615 робототехнических комплексов (увеличение на 34% по сравнению с 2012 г.). Общее число промышленных роботов, установленных в Российской Феде-

Таблица 8. Государственные программы развития робототехники в развитых странах

Страна	Название	Год	Основные направления	Оценка инвестиций
США	<i>National Robotics Initiative</i> [89]	2011	Цифровое производство, медицина и здравоохранение, сервисная, космическая и военная робототехника. Поддержка за счет исследовательских грантов	Примерно 500 млн долл. на робототехнику из 2,2 млрд долл. до 2020 г. на цифровое производство. На текущий момент профинансировано проектов примерно на 100 млн долл.
Европейский союз	<i>SPARC</i> [90]	2014	Промышленная, сервисная, робототехника	2,8 млрд евро, из них 700 млн — государственные гранты, 2,1 млрд — частные инвестиции
Франция	<i>France Robots Initiative</i> [91]	2014	Все области гражданской робототехники	100 млн евро, поддержка проектов через гранты на исследования и субсидии на модернизацию производств
Великобритания	<i>Robotics and Autonomous System</i> [92]	2014	Интеллектуальная робототехника и автономные транспортные системы	158 млн фунтов стерлингов на поддержку исследований и разработок
Япония	<i>Robot Revolution</i> [93]	2014	Промышленная и сервисная робототехника, фокусировка на персональной робототехнике для заботы о пожилых	Идет разработка программы. Анонсирована олимпиада по робототехнике в 2020 г.
Китай ¹	Программа модернизации промышленности в области Чжэцзян [94]	2013	Автоматизация и роботизация промышленности одного региона	82 млрд долл. в течение пяти лет
Южная Корея	<i>Intelligent Robot Development and Distribution Promotion Act</i> [95]	2014	Основная цель программы — стимулирование спроса на робототехническую продукцию национальных производителей	2,6 трлн вон в 2014–2018 гг.

¹ Данные по всему Китаю не представлены, однако о масштабе вложений можно судить по программе роботизации промышленности одной области.

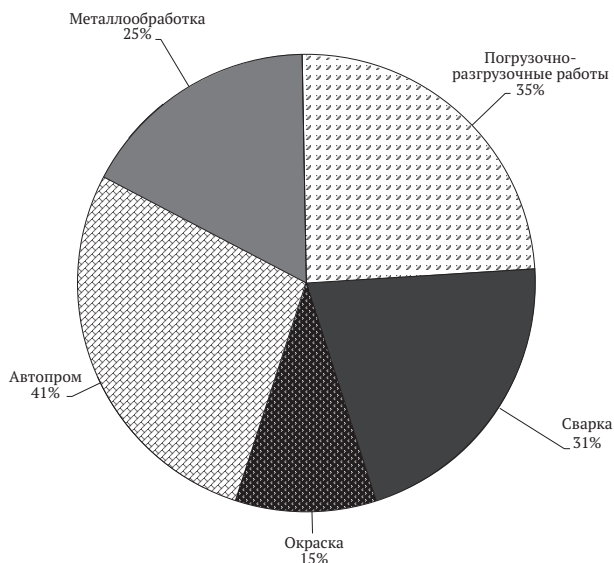


Рис. 19. Распределение промышленных роботов по секторам промышленности в Российской Федерации

Источник: Данные МФР, 2014 г.

рации, составило 2400 шт. Распределение между секторами производства показано на рис. 19.

Текущее значение плотности роботизации промышленности в Российской Федерации составило 2 РТК на 10 тыс. 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 крупных научных центров, вузов и частных компаний, проводящих исследования и разработки в области робототехники, — 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.

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) [96]. 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, позволяющую быстро наладить 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% [97]. Благодаря всем этим качествам АП по сравнению 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 [98]:

- 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 и уходит корнями в такие области, как фотоскульптура и топография [99]. У истоков современного АП, одним из наиболее известных методов которого служит стереолитография (*SL* — от англ. *stereolithography*), стоит подход, предложенный в 1951 г. Мюнцем (Munz). В системе Мюнца использован поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отверждения фотополимера по сечениям сканируемого объекта. В 1986 г. 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 [99]. Согласно отчету Королевской инженерной академии наук Великобритании за 2013 г., скачок в развитии 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 отношение 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 лет существования развитие АП сопровождалось ажиотажем и завышенными ожиданиями. По оценкам компании *Gartner* (2012 г.), в настоящий момент 3D-печать находится на пике «завышенных ожиданий» (рис. 20). Несмотря на то

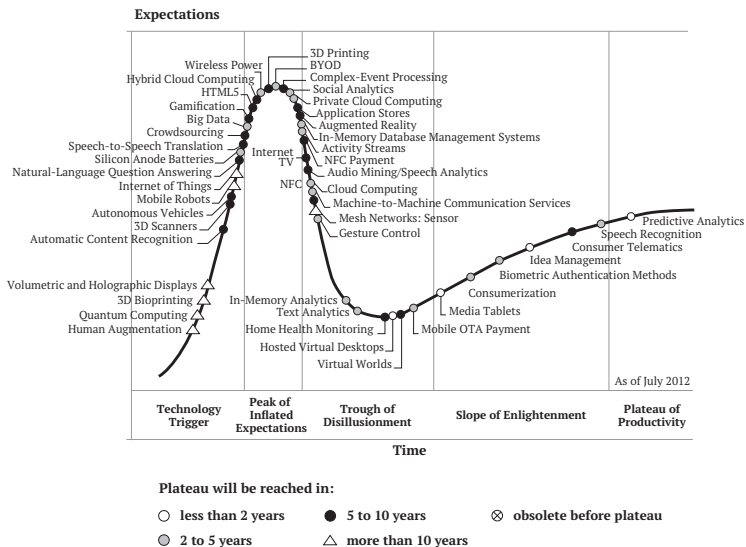


Рис. 20. Цикл зрелости технологий по состоянию на 2012 г., построенный компанией *Gartner*

Источник: [100].

что многие считают АП-технологии прорывными и ключевыми для третьей промышленной революции [101], пока их влияние в масштабе мирового производства остается весьма умеренным.

Консультант Терри Уолер (Terry Wohler) составляет и поддерживает наиболее полный свод знаний о технологиях АП, а также регулярно публикует отчеты, которые приобрели репутацию 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 долл. По прогнозам Уолера, к 2021 г. объем рынка АП составит более 10 млрд долл. Исследования *McKinsey Global Institute* свидетельствуют о том, что влияние АП на мировой ВВП может к 2025 г. достичь 550 млрд долл. в год [66]. Еще одним показателем, который отслеживает Уолер, является количество проданных установок АП. В 2012 г. было продано почти 8 тыс. промышленных систем (по цене выше 5 тыс. долл.). 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 (табл. 9, 10). В частности, *GE Aviation* объявил о серийном выпуске топливных форсунок для двигателя *LEAP* [101, 102]. Первые АП-системы выпускали 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 изготавливать детали 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 9. Процессы АП, сгруппированные по состоянию используемого материала

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

Источник: [103].

Рынок АП-установок делится на три сегмента [99]. 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, составляющие третий сегмент, позволяют открыть производство полимерных, металлических и керамических деталей; их цены варьируют от 200 тыс. долл. до 2 млн долл. [99]. 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 [104]. 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, который 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 [105]. Этот процесс включает моделирование детали и преобразование ее в файл формата *STL* для создания объемной полигональной сетки и поддерживающей структуры;

нарезку трехмерной модели в *STL*-формате для создания набора сечений; передачу рассеченной модели в стереолитографический аппарат (*SLA*); послойное формирование детали и поддерживающей структуры в ванне со специальным полимером с помощью аргонового лазера, который очерчивает двухмерные сечения и приводит к отверждению полимера; удаление поддерживающей структуры и при необходимости последующее отверждение детали для окончательной полимеризации посредством управляемого обогрева в УФ-печи. Стереолитография часто используется для быстрого прототипирования (БП) и изготовления инструментальной оснастки с целью создания пресс-форм и форм для литья. В последнее время изучаются возможности применения стереолитографии для тканевой инженерии в медицине [106]. 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 [107].

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

Как и стереолитография, *FDM* — один из самых распространенных процессов изготовления концептуальных и функциональных прототипов [108]. 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°C 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), ко-

торый 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, например [109–111]. 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 (JP, Inkjet Printing)

Как и стереолитография, струйная печать представляет собой нанесение и отверждение светоотверждаемых полимеров, как правило, на основе акрила [98]. 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 [112, 113]. 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 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 спекания 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 подготовке 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 (алюмоиттрие-

вый гранат с примесью неодимия), волоконные лазеры, дисковые лазеры и т. п. [113, 114]. 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 фазы 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 [114].

Селективная лазерная плавка (SLM, Selective Laser Melting)

Селективная лазерная плавка — это АП-процесс плавления порошка в емкости, подходящей для изготовления металлических, керамических и полимерных изделий [114]. Чаще всего используют металлические порошки с размером зерен в диапазоне 10–40 мкм. Порошок наносится на рабочую платформу распределителем, 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 [114], а отчеты показывают, что итоговые характеристики материала сопоставимы с характеристиками деталей, полученных механообработкой. Еще одно преимущество *SLM* состоит в возможности 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 чистой 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 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 [114]. 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 [115, 116]. 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 результатам 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 некоторых авиационно-космических приложений.

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 [117]. 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 10. Источники энергии и характеристики типичного оборудования для аддитивного производства

Установка	Процесс	Рабочее пространство, мм	Источник энергии
1	2	3	4
<i>Емкость с порошком</i>			
<i>ARCAM (A2) (a)</i>	<i>EBM</i>	200 × 200 × 350	Электронный пучок, 7 кВт
<i>EOS (M280) (b)</i>	<i>DMLS</i>	250 × 250 × 325	Иттербиевый волоконный лазер, 200–400 Вт
Концепт <i>LaserCusing (M3) (b)</i>	<i>SLM</i>	300 × 350 × 300	Волоконный лазер, 200 Вт
<i>MTT (SLM 250) (b)</i>	<i>SLM</i>	250 × 250 × 300	Иттербиевый волоконный лазер, 100–400 Вт
Группа систем <i>Phenix (PXL) (c)</i>	<i>SLM</i>	250 × 250 × 300	Волоконный лазер, 500 Вт

1	2	3	4
<i>Renishaw (AM 250) (d)</i>	<i>SLM</i>	245 × 245 × 360	Лазер, 200 или 400 Вт
<i>Realizer (SLM 250) (b)</i>	<i>SLM</i>	250 × 250 × 220	Лазер, 100, 200 или 400 Вт
<i>Matsuura (Lumex Advanced 25) (e)</i>	<i>SLM</i>	250 × 250 в диаметре	Иттербиевый волоконный лазер, 400 Вт
<i>Подача порошка</i>			
<i>Optomec (LENS 850-R) (f)</i>	<i>LENS</i>	900 × 1500 × 900	Волоконный лазер <i>IPG</i> , 1 или 2 кВт
<i>POM DMD (66R) (f)</i>	<i>DMD</i>	3200 × 3670 × 360	Волоконный лазер с диодной накачкой или дисковый лазер, 1–5 кВт
Система лазерного отверждения <i>Accufusion (g)</i>	<i>LC</i>	1000 × 1000 × 1000	<i>Nd: YAG</i> -лазер
Лазер <i>Irepa (LF 6000) (c)</i>	<i>LD</i>		Лазерное плакирование
<i>BeAM (MAGIC LF6000) (c)</i>	<i>CLAD</i>	1500 × 800 × 800	Волоконный лазер 1000–6000 Вт
<i>Trumpf (b)</i>	<i>LD</i>	600 × 1000 в длину	
<i>Huffman (HC-205) (f)</i>	<i>LD</i>		Плакирование CO_2 -лазером
<i>Подача проволоки</i>			
<i>Sciaky (NGI) EBFFF (f)</i>	<i>EBDM</i>	760 × 480 × 500	Сварочный источник тока мощностью от 40 кВт при напряжении 60 кВ
Система <i>MER</i> произвольной формовки (FFF) посредством селективной сварки плазменной дугой (f)	<i>PTAS FFF</i>	610 × 610 × 5180	Два источника постоянного тока 350 А для создания плазменной дуги

Источник: [118].

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* [119]. 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. 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%-му снижению веса и экономии материала [119]. Выполненный в рамках проекта анализ показывает, что снижение веса магистрального самолета на 100 кг на протяжении всего жизненного цикла влечет экономию 2,5 млн долл. на топливных расходах и сокращает выбросы углекислого газа на 1,3 млн т. Имеется несколько отчетов по результатам исследований влияния АП на окружающую среду [101, 120, 121]. Однако многие вопросы остаются нерешенными 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, проведенному 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. ТЕКУЩЕЕ И ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ 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.

По мере совершенствования существующих и разработки новых, более развитых технологий АП они находят все более широкое применение (рис. 21). Сегодня эти технологии используются для изготовления разнообразной продукции, в том числе медицинских имплантатов, ортопедических и стоматологических изделий, слуховых аппаратов, инструментов для формирования, деталей для авиационно-космической и автомобильной промышленности, электроники, персонажей видеоигр, произведений искусства, ювелирных изделий, коммерческого

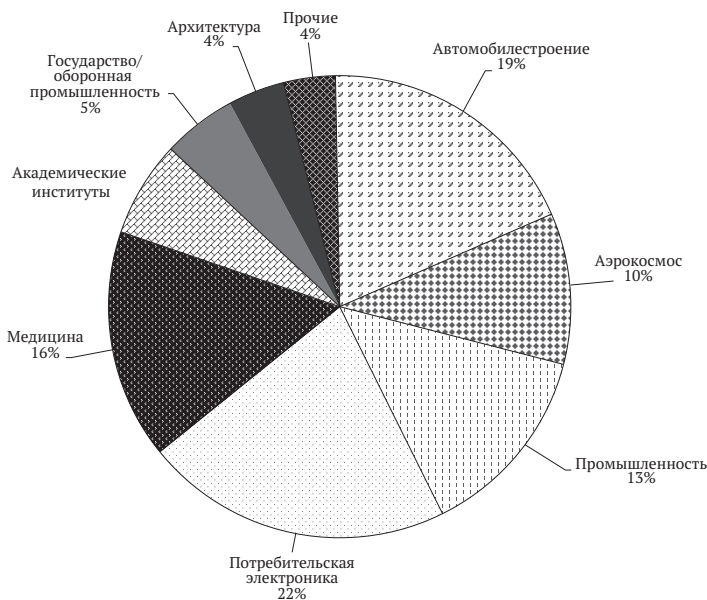


Рис. 21. Доля различных отраслей в структуре доходов поставщиков услуг АП

Источник: [104].

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 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

(например, МРТ или КТ) [122]. Результаты сканирования обрабатываются и передаются в специализированное программное обеспечение для выделения 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 [123, 124], искусственных челюстей [125], композитной части коленного сустава [126] и акриловых краниопластических имплантатов, изготовленных методом стереолитографии [127, 128]. С помощью *EBM*-системы *Arcam* налажено массовое производство ацетабулярных колпачков, применяемых при протезировании тазобедренного сустава. Использование АП позволяет производить имплантаты с пористой структурой, облегчающей прорастание тканей [104]. 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 суставных протезов (например, руки или кисти), упрощая сборку сложного узла и превращая его в единое изделие [129].

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, высокую совокупную стоимость и требуют значительной индивидуализации [130]. Сверх того, изготовление множества уникальных деталей за один производственный цикл делает возможной массовую кастомизацию продукции.

АП-технологии находят 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 протезирования 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* [103]. 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% [107].

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 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, весьма жесткие, поскольку отказ компонентов может с высокой вероятностью повлечь 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 [101, 102]. *GE* отметила, что может производить по меньшей мере 25 тыс. 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 тыс. деталей, которые уже используются в военных и гражданских самолетах компании [131].

В частности, *Boeing* установила компоненты, изготовленные из термопластика по процессу *SLS*, на гражданских само-

летах серий 737, 747 и 777 и использовала несколько сотен таких деталей на самолете 787-й серии [132]. 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.

Исследование 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 долл. на каждой детали, что дает годовую экономию 1 444 416 долл. [118]. Аналогично этому, как показывают расчеты, восстановление торцов лопаток в двигателе *AV8B*, изготовленных из титанового сплава *Ti-6Al-4V*, позволяет сэкономить 715 тыс. долл. в год [118]. Компания *BeAM*, производитель оборудования по технологии *CLAD*, занимается также восстановлением пяти видов деталей для газотурбинных двигателей *Pratt & Withney*, увеличивая срок их службы с 10 тыс. до 60 тыс. часов. Таким образом уже восстановлено более 600 деталей, при этом экономия достигает десятикратной величины от стоимости детали. Следует отметить, что неаддитивным способом восстановить эти детали невозможно. *NASA*, перейдя на аддитивное производство жаропрочных инжекторов для ракетных двигателей, сократило время изготовления с шести месяцев до трех недель и снизило затраты с 10 тыс. до 5 тыс. долл. на каждую деталь. 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 долл.

только за счет снижения на 50–80% веса металлических креплений в салоне при их изготовлении с помощью технологий АП [104].

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 [133]. 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 [134].

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* [135]. 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 составе несколько тысяч деталей. Печать автомобиля из термопластика, усиленного углеродны-

ми 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 долл. Другим пригодным для эксплуатации электромобилем, изготовленным с помощью 3D-печати, станет *Urbee 2*, который будет производиться с помощью технологии *FDM* [136].

Производство товаров потребления

Технологии АП нашли нишу и 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 [99, 104, 116, 118]:

- 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 не совершенно);
- различия 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 становится критически важным фактором для внедрения АП и необходимым предварительным условием для сертификации конструкционных узлов. В настоящий момент отмечается неустойчивость харак-

теристик от детали к детали и от установки к установке. Процесс аттестации технологии для того или иного материала может быть различным, однако некоторые обязательные элементы общие. Можно выделить три основных вопроса [118]:

1. Является ли технология применения данного материала проработанной и стандартизированной? Процесс производства материала должен соответствовать жестко заданной спецификации.
2. Имеется ли достаточно полное описание характеристик технологии применения данного материала? Необходимо наличие статистически достоверных данных о механических свойствах материала, соответствующих требованиям *MMPDS*.
3. Была 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 [118]:

- 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 долл.), так и с временной (требуется примерно 15 лет) [118]. Одна лишь наработка статистически

значимой базы данных обходится в 8–15 млн долл., требует испытания 5000–100 000 образцов и занимает более двух лет. Таким образом, требуются альтернативные подходы, позволяющие ускоренную аттестацию [118]. В США поиском таких методов занимаются агентство *DARPA* в рамках Открытой производственной программы (*Open Manufacturing Program*) и ВМС в рамках проекта *DDM ACT*. Национальный институт инноваций в области аддитивного производства (*NAMII*) 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 она различна для разных частей изделия, что порождает остаточные напряжения. Неуверенность в точности и надежности количественного описания теплового распределения в детали влечет 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 свою продукцию 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 данного типа производства с использованием металлов. В 2009 г. в Аме-

риканском 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 счете 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 табл. 11. 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 11. Факторы, благоприятствующие аддитивному и традиционному производствам

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

Источник: [118].

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. 22).

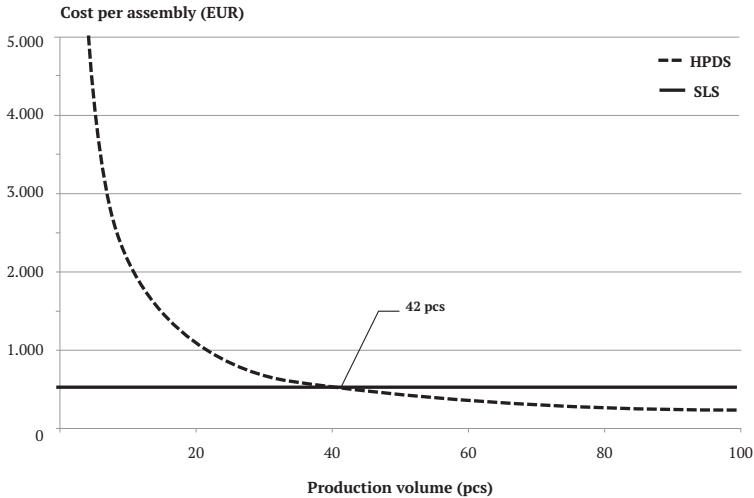


Рис. 22. Анализ рентабельности производства узла самолетного шасси при использовании литья под давлением (HPDC) и процесса SLS

Источник: [137].

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 [118]. Технологии АП способны сократить логистику, снизить расходы и затраты энергии, связанные с упаковкой, транспор-

тировкой и хранением запасных частей. Однако их точное влияние на цепочки поставок 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 промышленности и правительства (как федерального, так и местного). Все сильнее вовлекаются в эту деятельность национальные исследовательские институты и лаборатории Министерства обороны США.

«Дорожная карта» развития аддитивного производства, составленная в 2009 г. по итогам семинара с участием 65 ключевых экспертов [99], 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 ее направления:

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 градиентных материалов.
- Разработка методологии определения того, почему одни материалы могут быть обработаны методами АП, а другие — нет.
- Разработка инструментов для поатомного аддитивного производства структур и устройств и для проектирования нанопроизводства.
- Разработка экологичных («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 (например, решеток или ячеек), содержащих тысячи различных форм и/или состоящих из градиентных материалов [99]. 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 композиционных, 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, это 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 [99]. 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 планировать процесс 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 (например, 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, должны 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 достижения более полного и фундаментального понимания физических основ каждого процесса АП. В частности, одна из ключевых задач — более глубокое понимание деталей взаимодействия различных источников

энергии с материалами. Примером насущных задач такого рода может служить понимание того, как количество и распределение потребляемой энергии сказываются 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 монокристаллических материалов, а также зависят от характеристик процесса. Изучение механизмов поглощения энергии лазерного излучения порошками остается важным направлением исследований [114].

Необходимо обратить более пристальное внимание на системы АП смешанного типа [99]. Такие системы могут открыть новые возможности обработки, в том числе использование множественных аддитивных процессов, совмещение послойных технологий с другими, совмещение аддитивного и вычитающего производств, 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 выступает 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 считаются 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 служит его текучесть, поскольку в основе обработки лежит распределение порошка по поверхности (процессы *LS/LM*) или подача порошка (процессы *LMD*, *DMD*) [114]. 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, алюминия, 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 [118]; 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 фазо-

вых 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 [114, 118]. АП-материалы имеют преимущества благодаря менее выраженной химической сегрегации и мелкозернистости, которые достигаются быстрым охлаждением. Однако характерная для АП-материалов анизотропия микроструктуры влечет соответствующую анизотропию механических свойств — направление, перпендикулярное слоям, оказывается наиболее слабым. Динамические свойства АП-сплавов (например, 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 одних исследованиях утверждается, что оно критически важно для повышения сопротивления усталости [118], тогда как в других делается вывод о его незначительной роли в рамках динамического диапазона жизненного цикла изделия [114]. 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 [138], 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) [138]. 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* [139]. 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 производства «точно в срок», реализованного благодаря АП-технологиям, обусловлен высокими финансовыми потерями от простоя скважины. Важное направление исследований представляет 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 в настоящий момент являются, пожалуй, наиболее успешными вариантами аддитивного производства керамических деталей в масшта-

бируемых количествах. Роботизированное литье представляет собой экструзию керамической массы через формующее 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; 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 [139]. Например, компания *Ceralink, Inc.* (США) в настоящий момент комбинирует биомимикрический подход к проектированию с процессом *LOM*, использующим металлы и керамику. Другим перспективным приложением процесса *LOM* для изготовления керамических деталей становится 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 композиционных материалов. Так, было предпринято изучение применимости АП-технологий для производства материалов с многоуровневой иерархической функциональностью на нано- и микрошкалах. 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 [140]. В этом методе, названном ламинарным синтезом композиционного 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 металлокерамических композиционных 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* [114]. 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 композиционных материалов с керамической матрицей (*CMC — ceramic-matrix composite*) также является областью активных исследований [139]. Так, несколько групп изучают возможность изготовления деталей из интерметаллических/керамических композитов с получением формы изделия, близкой к заданной, с помощью инфильтрации материала в пористую структуру заготовок, полученных путем *3D*-печати [139].

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 инжене-

ров и исследователей было обучено применению технологий аддитивного производства. Для подготовки следующего поколения кадров в области АП требуется открыть 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. Диапазон деятельности этих компаний и центров относительно узок. Они выступают преимущественно в качестве посредников, продающих АП-оборудование, и/или занимаются быстрым прототипированием, которое для современного АП представляет вчерашний день. Очень малое количество компаний располагает мощностями для производства функциональных комплектующих из материалов с хорошими эксплуатационными характеристиками, 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, 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. В число ключевых факторов, которым необходимо уделить особое внимание, чтобы расширить применение АП-технологий в российской про-

мышленности, 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.

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 перспективными направлениями, по крайней мере, для внутреннего рынка.

2.5. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.5.1. СПРОЕКТИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Под спроектированными материалами будем понимать целенаправленно сформированные материалы с внутренней структурой, выстроенной таким образом, чтобы соответствовать заданному набору функциональных свойств, в том числе выходящих за рамки традиционных требований к обеспечению только несущей способности. Спроектированные материалы могут быть монокомпонентными (литыми) или представлять собой сплавы нескольких металлов, композиционные материалы на основе металлических, полимерных и керамических матриц [141,142].

Спроектированные материалы обладают огромным потенциалом и могут стимулировать прорывные исследования, по крайней мере, в двух областях. Первая область — разработка новых материалов и их использование при изготовлении деталей, узлов и агрегатов с применением традиционных технологий производства. Вторая область — разработка техноло-

гий (методов) производства деталей, узлов и агрегатов на основе получаемых новых материалов с уникальными свойствами. Различие между указанными областями не всегда может быть четко сформулировано, так как получение нового материала может происходить непосредственно в процессе изготовления конструкции и с учетом ее функционирования.

Соответственно в современном материаловедении интенсивно развивается многоуровневый иерархический подход к разработке новых материалов [143–155]. Это связано с тем, что разработка современных инженерных методов проектирования требует учета многоуровневой, иерархической организации материалов, конструкций, сред и систем различной природы.

При разработке многоуровневых иерархических материалов необходимо учитывать, что структурные элементы каждого из масштабных/структурных уровней вносят свой вклад, зачастую неаддитивный, в деформирование и разрушение материала в целом. Проектирование подобных материалов невозможно без привлечения как прямого, так и компьютерного эксперимента. Особое внимание уделяется структурным аспектам деформации и разрушения твердых тел (т. е. влиянию основных составляющих внутреннего строения материалов на их аккомодацию к внешним воздействиям) и вопросам, связанным с неоднородным развитием пластической деформации. Для адекватного описания деформации многомасштабных сред необходимо разрабатывать «иерархические» модели, позволяющие учесть взаимосвязь сложных процессов, происходящих на разных масштабах и структурных элементах [156]. Вопрос о том, какой должна быть иерархическая модель, остается дискуссионным, и как следствие для каждого конкретного случая такая модель создается адресно, т. е. учитывается специфика данного изделия/конструкции/системы. Таким образом, проблема разработки и создания материала на основе многоуровневого подхода не может быть решена без широкого применения моделирования процессов деформирования и разрушения материала в условиях работы изделия/конструкции/системы на разных масштабах — от атомарного до макроскопического.

Анализ современных тенденций показывает, что необходимо разрабатывать подходы, которые включают три основных компонента: 1) построение численной многоуровневой динамической модели конструкции (с использованием возможностей многоуровневого моделирования); 2) экспериментальное исследование и анализ поведения конструкции в целом и на разных уровнях/масштабах (от «ответственных» узлов и деталей до материала в составе конкретных элементов конструкции); 3) современные методы неразрушающего контроля материалов и оценки ресурса изделия/конструкции/системы.

Уровни проектирования материалов

Разработка и производство спроектированных материалов могут осуществляться на разных уровнях: а) атомном, б) наномасштабном, в) микромасштабном (с привлечением подходов микромеханики) и г) макромасштабном (с использованием макромеханических методов моделирования и проектирования) [141, 142, 157].

Исторически традиционным масштабом проектирования является макроскопический, а первыми спроектированными материалами стали полимерные композиты с волоконным армированием. Высокая удельная жесткость (на единицу веса) и высокая удельная прочность композиционных материалов по сравнению со сплавами на основе алюминия были главной причиной их использования в таких отраслях, как ракетно-космическая и авиационная, где вес конструкции был критическим параметром. И хотя уникальные технологии их производства позволяли варьировать форму и структуру, первоначальные подходы были строго консервативными. Конструкции, изготовленные из композиционных материалов, выглядели подобно их металлическим аналогам: при их проектировании использовали те же подходы к изготовлению и принципы расчета прочности и надежности конструкций, в которых они использовались.

Армированные композиционные материалы имеют важную особенность: их характеристики, такие как прочность

и жесткость, обладают сильно выраженной анизотропией. Соотношение свойств материала в различных направлениях может регулироваться типом и характером армирования. Даже если используется один тип волокон, требуемые свойства могут быть получены варьированием отношения доли волокон к объему связующего. Тем самым впервые в истории у конструкторов появилась возможность адресно проектировать свойства материалов, используемых при разработке деталей и элементов конструкций.

Развитие новых принципов создания перспективных материалов и технологий их получения привело к осознанию того, что проектирование материала на основе подходов макро- и микромеханики может быть выполнено и на меньших масштабах.

а) Атомный масштаб

На самом малом масштабе проектирование материала может быть выполнено с помощью численного моделирования на атомном уровне [158–159]. Компьютерное проектирование материалов считается формирующимся научным направлением, в котором главная задача — изучение механизмов отклика материала на внешние воздействия и поиск структурно-фазового состава, соответствующего материалу с требуемыми характеристиками. Поиск новых материалов с требуемыми свойствами становится проблемой глобальной оптимизации, при решении которой могут быть использованы различные схемы машинного обучения и математической оптимизации. Подобный поиск и выбор структурно-фазового состава являются высокоразмерностной оптимизационной проблемой, и потому полное ее решение труднодостижимо и долгое время считалось невозможным. Однако в последние годы эволюционные алгоритмы, использующие принцип естественного отбора, были успешно применены в разработке новых материалов [160].

б) Наноматериалы и нанокompозиты

Нанокompозитами называют композиционные материалы, у которых по крайней мере один из размеров армирующих элементов имеет порядок менее 100 нанометров [161]. Такие

композиционные материалы считаются перспективными из-за новых возможностей достижения высоких механических свойств, тепловых, электрических, оптических и других характеристик [162–164]. Высокие значения свойств нанокompозитов обусловлены тем, что:

- свойства наноэлементов армирования значительно выше свойств традиционно используемых наполнителей (например, волокон);
- отношение площади их поверхности к объему очень велико, что улучшает их взаимодействие со связующим, повышая межфазную адгезию.

Примеры элементов для наноармирования включают:

- низкоразмерные частицы и агрегаты, в том числе гибридные;
- углеродные нановолокна;
- углеродные нанотрубки (УНТ);
- частицы полихедральных олигомерных силсесквиоксанов;
- металлические нанопорошки;
- нанопорошки металлооксидной керамики;
- нанопорошки керамики на основе бескислородных соединений металлов и т. д.

Примеры улучшения характеристик материала при использовании наноармирования:

- увеличение вязкости разрушения углепластиков на 85% при введении наноглин или углеродных нанотрубок (УНТ) в связующее;
- увеличение вязкости разрушения стали на 30%, достигнутое замещением карбидов кластерами с мелкодисперсной карбидной структурой;
- увеличение сдвиговой прочности стеклопластика на 45% при введении углеродных нанотрубок.

Создание электропроводящих полимерных композиционных материалов при введении УНТ в связующее без потери их механических свойств позволяет получать полностью новые

продукты, такие как гибкие, прозрачные и проводящие пленки для электроники (например, сенсорные экраны).

Ранее внедрение продуктов на основе УНТ было ограничено их высокой стоимостью и малыми объемами производства, однако оба этих ограничения успешно преодолеваются в настоящее время. Большая часть разработок на рынке углеродного nanoармирования основана преимущественно на применении многостенных углеродных нанотрубок (МСНТ), а также углеродных нановолокон (УНВ). Спектр применения одностенных углеродных нанотрубок (ОСНТ) гораздо уже и пока отстает от МСНТ по своей значимости и объему. Основной причиной, обуславливающей такую тенденцию, является то, что, хотя высокая стоимость внедрения характерна для всех УНТ, стоимость ОСНТ в 50–100 раз превосходит стоимость МСНТ и УНВ. Тем не менее цены на все виды материалов, получаемых с помощью углеродного nanoармирования, снижаются в силу того, что растут объемы их производства.

Число производителей УНТ значительно возросло с истечением сроков действия патентов, принадлежащих пионеру рынка углеродных нанотрубок — *Hyperion Catalysis International*. Недавно компания *Bayer Material Science* представила новую технологию промышленного получения МСНТ с достаточной чистотой и более низкой стоимостью. Другими ключевыми игроками выступают французская компания *Arkema*, бельгийские *Nanocyl* и *Pyrograf Products*, расположенная в Сан-Диего компания *Ahwahnee Inc.*, две компании из Южной Кореи — *Carbon Nano-Material Technology* и *Iljin Nanotech*, а также японская *Showa Denka* и два поставщика из Северной Америки — *Raymor Industries Inc.* в Канаде и *Unidym Inc.* в США.

Сегодня более 100 компаний по всему миру производят УНТ, причем ожидается, что это число возрастет более чем до 200 в течение последующих пяти лет. В настоящее время доля УНТ составляет около 30% общего спроса на все наноматериалы. Основные производители УНТ и их годовые объемы производства в 2010 г. приведены в табл. 12. Следует также заметить, что компаний и институтов, активно вовлеченных в исследования в области УНТ, уже можно насчитать более тысячи по всему миру.

Таблица 12. Основные производители углеродных нанотрубок

Продукт	Производитель	Годовой объем производ- ства, т	Производ- ственный процесс	Страна
Одностенные углеродные нанотрубки	<i>Inidym, Inc. (acquired by Wisepower Co.),</i> http://www.unidym.com	1,5	<i>High-pressure carbon monoxide (HiPco)</i>	США
	<i>Toray Industries, Inc.</i> http://www.toray.com	1,5	<i>CCVD</i>	Япония
	<i>Mitsubishi Rayon Co. Ltd</i> http://www.mrc.co.jp/english/index.html	1,2	<i>CVD</i>	Япония
	<i>SouthWest Nano Technologies Inc.</i> http://www.swentnano.com	1,0	<i>Cobalt- molybdenum catalyst (CoMoCAT)®</i>	США
	<i>Kleancarbon Inc.</i> http://www.kleancarbon.com	1,0	<i>CVD</i>	Канада
Много- стенные углеродные нанотрубки	<i>Showa Denko K.K.</i> http://www.sdk.co.jp/english	500	<i>CCVD</i>	Япония
	<i>CNano Technology Limited</i> http://www.cnanotechnology.com	500	<i>CCVD</i>	США
	<i>Nanocyl S.A.</i> http://www.nanocyl.com	400	<i>CCVD</i>	Бельгия
	<i>Bayer Material Science AG</i> http://www.bayermaterialscience.com	260	<i>CCVD</i>	Германия
	<i>Arkema Inc.</i> http://www.arkema-inc.com	50	<i>CCVD</i>	Франция
	<i>Hyperion Catalysis International, Inc.</i> http://www.hyperioncatalysis.com	50	<i>CVD</i>	США

в) Микромеханическое проектирование

Посредством управления внутренней структурой на основе подходов микромеханики можно получать материалы с исключительно высокими жесткостью, прочностью, трещиностойкостью и другими механическими характеристиками [165–171]. В качестве примеров можно привести процессы создания гибридных композиционных материалов, композитов с иерархической структурой, тканых, плетеных и вязаных текстильных преформ.

При комбинировании разных типов волокон в гибридных композиционных материалах и/или применении специально спроектированных схем армирования в материалах с иерархической структурой оптимизируется структура, что обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик изделия/конструкции в целом. Применение гибридных композитов наиболее востребовано в коммерческом самолетостроении, что связано с такими их характеристиками, как повышенная трещиностойкость, ударная прочность, усталостная долговечность, меньшая чувствительность к концентраторам напряжений (надрезам, отверстиям и пр.).

г) Проектирование на макроуровне

Проектирование материала на этом уровне — наиболее распространенная практика [172], что сложилось исторически при разработке деталей из композиционных материалов [173]. Основным подходом, применяемым в настоящее время, служит изменение свойств материала от одной дискретной области проектируемого элемента конструкции к другой путем изменения числа слоев, а также углов ориентации армирующих волокон. Достоинством этого подхода с точки зрения перспективных технологий считается «аддитивный» характер этого производства. Локальное изменение толщины и даже геометрии детали в различных областях достигается путем не механической (вычитающей) обработки, а добавления слоев.

Последние тенденции в этой области заключаются в переходе от дискретного к непрерывному изменению параметров и свойств во всей композитной детали. Это достигается путем

непрерывного управления углами ориентации волокон при выкладке и возможностями 3D-печати. Также появляется возможность проектировать/контролировать направления действия нагрузок в конструкции, так как в конструкциях из композиционных материалов распределение нагрузок существенно зависит от направления укладки волокон. Однако для создания таких конструкций необходимо использование специального автоматического выкладочного оборудования, которое будет рассматриваться ниже. При этом важную роль играют многоуровневое моделирование и динамическое испытание как компьютерной, так и экспериментальной модели изделия/конструкции. Основное преимущество заключается в том, что конструкторы получают инструментарий для того, чтобы оптимально функционализировать свойства материала исходя из воздействий на конструкцию в процессе эксплуатации.

Производство спроектированных материалов и конструкций

Несмотря на то что современные композиционные материалы используются в течение более чем пяти десятилетий, технологии производства деталей и конструкций из этих материалов долгое время пребывали в «зачаточном» состоянии. Удивителен тот факт, что многие промышленные приложения, за исключением нескольких специальных областей, ранее были основаны лишь на технологии ручного производства. Полуавтоматизированные или автоматизированные производственные технологии применялись лишь при изготовлении баллонов и труб путем намотки жгутов или пучков нитей на выпуклую поверхность сосуда по геодезическим или окологеодезическим траекториям. Другим автоматизированным видом технологии было пултрузионное производство однонаправленных волокнистых композиционных материалов. Высокоточная, сложная техника начала применяться для производства крупногабаритных композитных деталей и конструкций только в 1990-х гг. с появлением машин автоматизированной выкладки лент (ABJ) и автоматизированной выкладки волокон (ABB).

Применение автоматизированной техники для производства композитных конструкций, имеющих нестандартную геометрию, позволит сломать ценовой барьер, препятствующий масштабному внедрению композиционных материалов в производство потребительских товаров. Машины ABB и ABJ, упомянутые выше, являются лишь предтечами автоматизированных систем, которые однажды станут частью более сложной сборочной линии композитных конструкций, способной сочетать различные части композитной конструкции и типы армирования. Схожий путь от ручной сборочной линии до автоматического роботизированного производства прошло автомобилестроение.

2.5.2. МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ для аддитивных производственных технологий

Анализ имеющихся данных говорит о том, что область материалов для АП-технологий находится в зачаточном состоянии и в ней, без сомнения, развернется острая конкурентная борьба. По существу, необходимо создание нового материаловедения, что связано с решением таких сложных научных и технологических проблем, как:

- 1) разработка и создание порошковых систем с управляемыми/контролируемыми в условиях АП размерными, физико-химическими и геометрическими параметрами/свойствами;
- 2) разработка подходов и моделей для описания процессов формирования структурно-фазовых состояний непосредственно в процессе 3D-печати;
- 3) разработка численных методов и испытательных систем для реализации многоуровневого (с учетом локального структурно-фазового состояния материала) динамического моделирования изделий и конструкций.

В настоящее время не существует общих требований к металлопорошковым композициям, применяемым в АМ-технологиях. Разные компании-производители АМ-машин предписывают работу с определенным перечнем материалов, обыч-

но поставляемых самой этой компанией. В разных машинах используются порошки различного фракционного состава. Одним из параметров, характеризующих порошок, служит величина d_{50} — «средний диаметр частиц». Например, $d_{50} = 40$ мкм означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм.

Так, например, в машинах *Phenix Systems* используется порошок с $d_{50} = 10$ мкм; для машин *Conzept Laser* дисперсность порошка лежит в пределах 25–52 мкм при $d_{50} = 26,9$ мкм; для *Arcam* размер частиц составляет 45–100 мкм, для машин *SLM Solutions* $d_{50} = 10$ –30 мкм и т. д. Существует определенное недоверие к порошкам разных производителей. Нет никакой гарантии, что, купив материал у одного производителя и дополнительное количество у другого, вы получите изделия одинакового качества. Все это диктует необходимость стандартизации материалов для АМ-технологий. Здесь тоже необходима большая исследовательская работа, поскольку современные методы, применяемые при оценке свойств материалов для традиционных технологий, не могут быть применены к аддитивным технологиям из-за наличия анизотропии, неизбежной при послойном принципе создания изделия.

За рубежом вопросы стандартизации по материалам для аддитивных технологий находятся в компетенции *NIST* — *National Institute of Standards and Technology* (США); Международной организации по стандартизации *ISO* (комитет *TC261* по аддитивным технологиям) и *ASTM* (международный комитет *F42* по аддитивным технологиям). В настоящее время разработан только один стандарт (*ASTM F2924*) на материал *Ti-6Al-4-V* для применения в технологиях *Powder Bed Fusion*.

Особенность процесса лазерного синтеза, например, по технологии *SLM* состоит в том, что при построении детали лазерный луч не только сплавляет частицы порошка, формируя тело детали, но и «портит» материал, непосредственно прилегающий к поверхности строящейся детали. Поэтому в практике работы с *SLS*-машинами применяют методы просеивания отработанного материала с целью удаления «бракованной» части с дальнейшим перемешиванием «работавшего» порошка со свежим. В какой пропорции — каждая компания

решает по-своему. Таким образом, идентичность образцов, построенных на одной машине из одного и того же порошка, но с учетом этих нюансов, также не гарантирована.

Общим требованием к порошкам для АМ-машин становится сферическая форма частиц. Это связано, во-первых, с тем, что такие частицы более компактно укладываются в определенный объем, и, во-вторых, с необходимостью обеспечить «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением. Это как раз достигается при сферической форме частиц.

Если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения легкие частицы будут «вылетать» из зоны расплава, что приведет к обратному результату — повышенной шероховатости детали, микропористости. Еще один нюанс: для того чтобы вылетающие из зоны расплава частицы не попадали на соседние уже сплавленные участки поверхности строящегося слоя, внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», который сдувает вылетевшие частицы в сторону. Это также может привести к слишком интенсивному выносу строительного материала из зоны построения. В силу этих причин при работе с мелкодисперсными порошками с $d_{50} < 10$ мкм применяют маломощные, следовательно, малопроизводительные лазеры. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микродеталей, которые иным способом изготовить невозможно.

Определенные трудности при работе с мелкодисперсными порошками возникают в связи с их повышенной склонностью к комкованию. Это предъявляет особые требования к условиям хранения материалов и эксплуатации АМ-машин.

Методы получения металлических порошковых материалов для аддитивных технологий

Существует множество методов получения металлопорошков, условно их разделяют 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 отличаются 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 и диспергирование расплавов посредством струи газа или жидкости. Этот процесс называют также 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 [174]. 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.

Более 90% всех порошков, применяемых в аддитивных технологиях, получают методами диспергирования расплава. Основными технологиями получения порошков для АМ-машин являются:

- газовая атомизация (разновидности технологии — водяная и масляная атомизация);
- вакуумная атомизация;
- центробежная атомизация.

Газовая атомизация. Согласно этой технологии металл расплавляют в плавильной камере (обычно в вакууме или инерт-

ной 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 и камеру атомизации вакуумируют для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом, непосредственно перед процессом распыления камеру распыления заполняют инертным газом до атмосферного давления, а в плавильной камере создается избыточное давление. А саму технологию получения порошков с использованием машин для вакуумного плавления называют VIGA — *Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization*, т. е. «технологией газового распыления металла, расплавленного в вакуумной камере путем индукционного нагрева». Применяются как поворотные тигли (для высокопроизводительных машин), так и тигли с донным сливом (в основном для лабораторных установок).

Для плавки возможно использование керамических тиглей, «холодного тигля» для плавки высокоактивных материалов, а также бестигельной плавки медленно вращающегося электрода в коническом индукторе. В зависимости от материала тигля температура плавления может достигать 2000°C . Расплавленный металл сливают в специальный приемник, к которому подводят инертный газ под давлением (обычно аргон, иногда азот).

Процесс распыления металла для лабораторных установок имеет три фазы — начальную, рабочую и заключительную. В начальной фазе система выходит на рабочий режим: открывается клапан для слива металла (необходимо некоторое время для стабилизации потока), включается подача распылительного газа, причем в точно определенном соотношении между количеством металла и распыляющего газа. Эта фаза длится несколько секунд.

Далее начинается рабочая фаза, в которой процесс слива металла стабилизируется и достигается требуемое соотношение расхода металла и аргона в распылителе. В конце ра-

бочего процесса скорость выхода металла из тигля снижается, параметры потока изменяются и нарушается баланс между отношением массы металла и газа. Этот процесс также длится несколько секунд. В первой и заключительной фазах порошок получается некондиционный. Поэтому для повышения производительности и эффективности системы необходимо увеличивать долю рабочей фазы в общем балансе времени цикла атомизации. Узел атомизации там, где происходит собственно процесс распыления металла, это весьма сложное устройство, которое по конструктивным и технологическим соображениям не может быть меньше определенных размеров. Для качественного распыления должно быть выдержано соотношение между расходом металла и расходом газа. Минимальный расход металла составляет примерно 8 кг/мин, или около 1,0 л/мин (по стали). Поэтому если атомайзер имеет тигель объемом 1,0–3,0 л, использовать его для коммерческого получения порошков нецелесообразно. Весь процесс будет слишком кратковременным для стабилизации распыления в рабочей фазе, и выход кондиционного порошка будет невелик. Следует учитывать и постепенное снижение температуры газа на форсунке (до минусовых значений), что связано с его интенсивным расширением на выходе из форсунки при использовании дозвуковых газодинамических сопел. Это приемлемо для исследовательских целей, но нецелесообразно для коммерческого использования.

Промышленные атомайзеры отличаются большей стабильностью процесса за счет применения устройств предварительного подогрева газа, а также изменением условий факела распыляемого металла.

Для производства порошков технически рациональной нижней границей объема тигля считается 5,0 л (около 40 кг по стали). В этом случае время распыления составит примерно 5 мин, длительность рабочей фазы — около 4,5 мин. Фракционный состав порошка может быть расширен путем увеличения расхода металла через сливной канал.

Атомайзеры типа *VIGA* применяются, в частности, для получения следующих порошков:

- никелевые жаропрочные сплавы (например, *Inconel 718*, *Rene 88* и т. д.) для деталей авиационных и стационарных турбин;
- сплавы на основе кобальта для использования в медицине, стоматологии и производстве мишеней ионного распыления;
- порошки для плазменного напыления (например, *NiCrAlY*, *CoCrAlY* и т. д.) защитных покрытий на детали из жаропрочных сплавов;
- порошки для гранульной металлургии (например, *17-4 PH*, *316L*), используемые в автомобильных деталях массового производства;
- композиции для спекания в порошковом слое (например, кобальтовые сплавы, драгоценные металлы), используемые в АМ-машинах;
- высоколегированные стали (например, инструментальная сталь, быстрорезы) с очень высоким содержанием карбидов;
- цветные металлы (например, медные или оловянные сплавы для различного применения).

Технология *EIGA* (*Electrode induction guide inert gas atomization* — индукционная плавка электрода с распылением газом) — является еще одним видом газовой атомизации и разработана специально для получения порошков реактивных металлов — Ti, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и т. д., поскольку плавка этих металлов в керамических тиглях затруднена даже в условиях вакуума, а в холодном тигле связана с высокими затратами энергии.

EIGA-атомайзер применяется для получения металлических порошков методом распыления в струе аргона. Согласно технологии *EIGA* прутки (так называемый *feed stock* — сырье, исходный материал) после предварительной выплавки в форме электродов проходят индукционную плавку и распыляются без использования плавильного тигля. Плавление производится опусканием медленно вращающегося электрода в конический индуктор. Капли металла стекают с торца электрода в полость форсунки и распыляются инертным газом. Типичными материалами, получаемыми по технологии без использования керами-

ки, являются тугоплавкие и активные материалы, например TiAl, FeGd, FeTb, Zr и Cr. Она может использоваться для многих других конструкционных материалов на основе Fe, Ni, Co также с высокой производительностью за счет полунепрерывного принципа действия и быстрой смены электрода.

Другой вид атомизации — технология плазменного распыления: в нашей стране наиболее распространена технология плазменного распыления быстровращающегося электрода (*PREP — Plasma Rotating Electrode Process*), когда энергия плазменной струи подводится к торцу вращающегося со скоростью 15 000–22 000 об/мин электрода. Образование частиц порошка происходит под действием центробежных сил. Данная технология характеризуется наибольшей сферичностью получаемых гранул и более крупным их размером по сравнению с газовой атомизацией. Применение новых плазмотронов и повышение скоростей вращения электрода позволили перевести основной рабочий диапазон в область, пригодную для аддитивных технологий, и получать достаточно большой выход по частицам 40–100 мкм.

За рубежом помимо *PREP*-технологии распространение получила технология *Plasma Atomization*, в которой плавление металла производят с помощью нескольких плазмотронов, которые при контакте с распыляемым материалом (электродом или проволокой) в фокусной точке обеспечивают плавление и диспергирование образующихся капель расплава. Например, атомайзер компании *Raymor* (Канада) содержит три плазмотрона — генератора потока ионизированного газа, сфокусированных в точку, куда подводят металл в виде проволоки. Недостаток технологий состоит в необходимости организации специального производства фидстока — прутка (проволоки) Ø 1–5 мм, однако таким образом можно получать высококачественный, особо чистый порошок молибденовых, титановых сплавов и сплавов ниобия, тантала, Co-Cr в широком и управляемом диапазоне фракционного состава.

Вакуумная атомизация. Процесс вакуумной атомизации в зарубежной литературе часто называют *soluble gas atomization*, т.е. атомизацией за счет растворенного в расплаве газа. Суть его состоит в следующем. Атомайзер состоит из двух ка-

мер — плавильной, внизу, и распылительной —верху. 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» их изнутри, формируя гранулы.

Качество порошков, получаемых различными методами. Качество получаемых порошков зависит от метода их получения. В зависимости от формы частиц порошки имеют различные насыпную плотность, текучесть, гранулометрический состав, что влияет на точность дозировки (формирования слоя) порошкового материала при использовании в установках аддитивного производства. Скорость кристаллизации частиц и их эффективная поверхность определяют содержание вредных газовых примесей (главным образом кислорода и азота), что напрямую влияет на качество конечной детали.

Порошки, получаемые физико-химическими и механическими (размолом) методами, неприменимы для аддитивных технологий вследствие высокого содержания кислорода и осколочной формы. Последнее не позволяет обеспечить формирование плотного слоя при селективном сплавлении или при нанесении в виде газопорошковой смеси.

Порошки, получаемые газовой, плазменной и центробежной атомизацией, отличаются преимущественно сферической формой и высокой скоростью кристаллизации частиц, что обеспечивает минимальную площадь поверхности и минимальное содержание кислорода (обычно менее 0,01%) и азота (в зависимости от сплава на уровне 0,005–0,01%).

К показателям качества гранул относится и дефектность. Самым распространенным дефектом наиболее применяемых газораспыленных порошков считается наличие сателлитов — мелких гранул, сросшихся на поверхности более крупных частиц. Их наличие может вызывать проблемы при использовании относительно крупных порошков (более 50 мкм), основная же фракция, применяемая для селективного сплавления (менее 40 мкм), практически лишена этого дефекта.

Порошок, получаемый по *PREP*-технологии, характеризуется близкой к идеальной формой частиц, но получение тонких фракций, пригодных для селективного сплавления с достаточным выходом годного, представляет серьезную проблему. Однако данные порошки могут с успехом применяться для технологии *DMD* при подаче порошка в виде газопорошковой смеси.

Формирование требований к порошкам, применяемым в аддитивных технологиях

По сути, в аддитивных технологиях применяются металл-порошковые композиции, в которых соотношение различных фракций обеспечивает формирование слоя с высокой плотностью упаковки. Это в большей степени относится к технологиям послойного селективного сплавления, так как в технологиях типа *DMD* часть порошкового материала при нанесении в виде газопорошковой смеси рассеивается, не попадая в фокальное пятно источника энергии, и затем используется повторно.

Баланс фракционного состава должен обеспечивать нормальное формирование слоя (большое количество тонкой фракции может приводить к излишней агломерации и появлению при разравнивании слоя комков). Кроме того, избыток тонкой составляющей означает повышенный уровень газовых примесей, что связано с большей удельной поверхностью наиболее дисперсных частиц, а нехватка — формирование неплотного слоя и повышенную пористость синтезируемого материала.

Высокая чистота порошков по газовым примесям определяется не только способом получения, но и чистотой исходных материалов (шихтовой заготовки, расходуемого электрода), что делает необходимым жесткое регламентирование применяемых исходных материалов.

Таким образом, к порошкам для аддитивных технологий должны быть выработаны основные требования:

- 1) по сферичности (может косвенно определяться по текучести порошка) и насыпной плотности;

- 2) по фракционному составу (определяется для конкретных марок материала);
- 3) по химическому составу и газовым примесям (для конкретных металлопорошковых композиций).

Определение оптимальных характеристик для каждой конкретной марки сплава требует проведения отдельной НИР, привязанной не к абстрактному материалу, а к конкретному синтезируемому изделию.

Для получения воспроизводимых стабильных результатов порошки надо производить по вновь разработанным техническим условиям, в которых должны жестко регламентироваться исходная шихта, технология и параметры получения (в том числе чистота применяемой расплывающей или защитной среды), условия транспортировки и хранения.

Следует понимать, что синтезированный материал не соответствует в полной мере аналогу, получаемому по классическим технологиям (литья и деформации), а представляет собой новый материал, который подлежит общей квалификации (паспортизации), при этом уровень свойств будет в значительной мере зависеть от параметров синтеза, ориентации детали в камере построения и последующей термической или газостатической обработки. Часть материалов, вероятно, потребует доработки химического состава для более эффективного применения в аддитивных технологиях (например, несвариваемые сплавы), для снижения склонности к появлению трещин и других структурных дефектов.

2.5.3. Технологии инъекционного литья из порошковых композиций

Конкурентоспособность широкого класса изделий (общего машиностроения, бытовой техники, автомобилестроения, авиационного, электроники) в значительной степени определяется технико-экономическими характеристиками конструкционных элементов и применяемых при их изготовлении материалов и технологий. Для получения изделий небольшого размера, массой до 300 г, сложной геометрической формы ведущими за-

рубежными компаниями внедрены и широко применяются технологии инжекционного формования порошковых композиций (*powder injection molding*, или *PIM*-технологии). Перспективность и интенсивное развитие *PIM*-технологий определяются такими преимуществами, как возможность оптимизации конструкции детали, что обусловлено снятием практически всех ограничений по сложности формы изготавливаемого изделия; увеличение плотности и прочности детали; возможность придавать поверхностям формируемых изделий варьруемую структуру и свойства, например низкую шероховатость, текстурированность и пр.; высокий коэффициент использования материала — 0,97–0,994; возможность получать изделия с минимальной толщиной сечения стенки — до 0,5 мм; высокая производительность процесса и возможность полной автоматизации и роботизации производства.

Основные стимулы и предпосылки развития PIM-технологий

Предпосылки развития PIM-технологий

При получении *PIM*-изделий применяют технологическое оборудование и приемы, заимствованные из технологий литья пластмасс под давлением. *PIM* обеспечено развитием производства порошков и связующих, аппаратуры контроля их качества, методов получения порошков сферической формы, контролируемого размера, а также оборудования для получения их гомогенных смесей с термопластичным связующим. Развитие этих технологий позволило получать фидстоки — порошковые композиции заданного состава, из которых далее методом литья термопластических материалов получают заготовки изделий.

В основе *PIM*-технологий лежит объединение методов пластического формования и спекания порошков, что позволяет получить детали сложной геометрической формы в многоразовой оснастке и снизить или совсем устранить необходимость дальнейшей механической обработки. По сравнению с традиционными технологиями литья и порошковой метал-

лургии *PIM*-технологии обеспечивают снижение в 5 и более раз себестоимость изготовления изделий сложной геометрической формы [175–176].

Важной особенностью *PIM*-технологий является возможность получения мультимодальной внутренней структуры за счет локальной интенсивной пластической деформации в процессе инжектирования, что открывает новые возможности управления физико-механическими свойствами конечного изделия.

Потребности рынка

Базовая сегментация рынка *PIM* основана на разделении по признаку применяемых материалов. Около 82% рынка *PIM* составляют изделия, изготовленные на основе металлических порошков (*MIM*-технологии), остальные 18% — на основе керамических порошков (*CIM*-технологии).

В 2012 г. продажи изделий, полученных по *PIM*-технологиям, составляли около 1,5 млрд долл. Продажи на рынке *PIM* к 2017 г. оцениваются в объеме до 4 млрд долл. В том числе около 30% рынка — США, 30% — ЕС, 40% — страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Около 82% рынка *PIM* составляют изделия, изготовленные на основе металлических порошков. Региональное распределение применения *MIM*-технологий иллюстрируется на рис. 23.

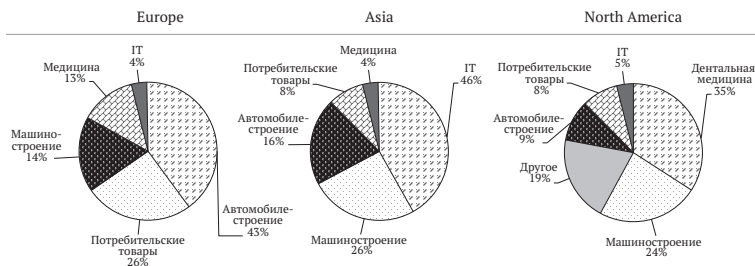


Рис. 23. Региональное распределение применения *MIM*-технологий. Данные по Европе и Северной Америке относятся к 2010 г., по Азии — к 2008 г.

Источник: [177].

Преимущества *ММ*-технологий иллюстрируются данными, представленными в табл. 13.

Таблица 13. Сопоставление возможностей различных производственных технологий

Направление	Механо- обработка	Точное литье	Порошковая металлургия	ММ
Вес, г	1–10 000	1–1000	5–2500	0,01–200
Точность размеров, %	< 0,1	0,5–1,0	0,1	0,3–0,5
Относительная плотность, %	100	99	92	98–99
Прочность, % макс.	100	> 95	70	> 95
Толщина стенки, мм	1–100	2–20	2–20	0,3–10
Шероховатость поверхности — Ra, мкм	0,2–4	5	2–5	1
Сложность	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Возможность массового производства	Средняя — высокая	Средняя	Высокая	Высокая

Развитие *ММ*-технологий обеспечило получение изделий сложной геометрической формы со свойствами материала, близкими к свойствам проката. В этом смысле *ММ*-технологии пришли на смену традиционным технологиям *РМ*, которые обеспечивают недостаточную плотность материала и потерю прочностных характеристик. *ММ*-технологии обеспечили изготовление (а) сложной формы изделий (б) из широкого спектра материалов (в) с высокими характеристиками (приближающимися к изделиям, полученным мехобработкой: толщина стенки от 0,5 мм, шероховатость 1 мкм, прочностные свойства на уровне проката), но при этом (г) значительно более высокой производительности и (д) меньшей себестоимости. Благодаря возможности изготовления сложной формы изделий *РМ* позволяет выбирать геометрию, обеспечивающую существенное снижение массы изделия с допуском по размерам на уровне 0,3–0,5% размеров изделия. Диапазон массага-

баритных характеристик *МІМ*-изделий (возможны изделия за рамками этих характеристик, вопрос в экономической эффективности): масса — от 0,1 до 100 г, длина — до 250 мм, толщина стенки — от 0,5 до 6 мм. При этом *МІМ*-изделия допускают широкий спектр постобработок: термообработку, азотирование, борирование и т. д., химическую обработку, травление, мехобработку, нанесение покрытий (фосфатирование, эмалирование, гальванопокрытия, органические и износостойкие вакуум-плазменные покрытия).

Развитие *СІМ*-технологий обусловлено прежде всего физическими свойствами керамики — жаропрочностью, электроизоляционными свойствами, коррозионной стойкостью, биосовместимостью. *СІМ*-технология предназначена для получения изделий из оксидов (Al, Mg, Zr), карбидов и нитридов, силицидов и боридов, солей (хлоридов, сульфатов, нитратов). Наиболее емким считается рынок оксидов, наименее емким — солевой керамики.

Области применения и ограничения *РІМ*-технологий

Первые примеры успешного применения *МІМ*-технологий были получены в 1979 г. (*Parmatech Corp.*) при изготовлении крепежа сложной геометрии для самолетов «Боинг-707/727» и др., и в том же году та же компания изготовила распорную систему ракетного двигателя *Rocketdyne*. В 1988 г. компания *Remington Arms* произвела прицельные планки для винтовки *Remington model 700 BDL*, а в 2000-м — детали механизма затвора. Сегодня детали, изготавливаемые по *РІМ*-технологии, используются в самых разных областях. Ниже приведен далеко не полный список областей применения *РІМ*-технологий, который ограничивается лишь воображением конструктора или дизайнера в конкретной сфере, а также опытом технолога и качеством используемого оборудования:

1) автомобилестроение:

- дверные замки, система впрыска топлива, системы активной безопасности, электромоторы дверей, детали турбин (*МІМ* — металлические изделия);

- керамические клапаны для двигателей, керамическое сцепление в спортивных автомобилях (*CIM* — керамические изделия);
- 2) *точное машиностроение, приборостроение, авиакосмическое строительство:*
- элементы режущего инструмента, зубчатые колеса, рабочие колеса насосов, прижимные лапки швейных машин, корпуса и детали часов (*MIM*);
 - режущие СМП, керамические сопла для струйной очистки и гидроабразивной резки; фильеры, волокна, керамические подшипники скольжения (*CIM*);
- 3) *электроинструмент, электроника:*
- запасные части к перфораторам, дрелям; ножи, решетки мясорубок, блендеров, кухонных комбайнов (*MIM*);
 - теплоотводящие радиаторы (на основе AlN , Al_2O_3), высокотемпературные изоляторы, трубки, чехлы термпар, керамические бусы, датчики и пускатели, пьезокерамика, микроволновые и радиолокационные сенсоры для бесконтактного измерения, сенсоры кислорода, оптически прозрачная керамика (*CIM*);
- 4) *медицина:*
- ортодонтические брекет-системы, хирургический инструмент, имплантаты, эндодонтические наконечники, инструмент для биопсии (*MIM*);
 - биокерамика — зубная и ортопедическая на основе фосфатов Ca , Na , керамические излучатели для стерилизации медицинского инструмента (*CIM*);
- 5) *бытовая техника, потребительские товары, спортивный инвентарь, музыкальный инструмент, ювелирная и часовая промышленность:*
- держатели датчиков, компоненты роботов, насосов, клапанов, замков, логотипы, вставки клюшек для гольфа, детали музыкальных инструментов, фото- и видеокамеры, ножи, грузила для рыбалки, корпуса и браслеты часов, механизм завода, венчальные кольца, запонки для манжет (*MIM*);
 - регулирующая, запорная арматура: задвижки, поворотные заслонки, вентили, регулирующие клапанные пары (шар-седло), втулки сальникового узла (*CIM*).

Основные ограничения *PIM*-технологий лежат в сфере экономики:

- относительно высокие инвестиционные затраты (разработка и изготовление литьевой формы, обеспечивающей корректный учет усадки для получения изделий с заданной точностью; проверка режимов и при необходимости изготовление новой формы), которые обеспечивают окупаемость только при высоких объемах (от 10 до 20 тыс. ед. в год для изделий средней сложности геометрии и порядка 1000 ед. в год для изделий сложной формы);
- относительно высокие операционные затраты, которые определяет стоимость сырьевых материалов (оптимальны изделия массой менее 50 г со средней толщиной стенки).

В России *PIM*-технологии практически не применяются [178]. Известны несколько отечественных компаний, выпускающих небольшие партии *PIM*-изделий из фидстоков зарубежного производства: «Технологическая компания», г. Москва (mimtech.ru), ЗАО «Группа АНИКС», г. Москва (anics.com), выпускающие *MIM*-изделия из фидстоков компании *BASF* (*Catamold*) [179] и ООО «Синтез», г. Дзержинск (sintez-pm.com), выпускающая *MIM*-изделия из фидстоков, произведенных в Доминиканской Республике. Отечественное промышленное производство фидстоков отсутствует. Объем продаж *PIM*-изделий компании «Синтез» составляет около 3 млн долл.

Ожидание развития рынка *PIM* в России связано с усилиями по систематизации потребностей крупных отечественных компаний, реализуемых в рамках ПИР и СПИ, в том числе на основе систематической замены изделий, получаемых механической обработкой, на *MIM*- и *SIM*-изделия, а также расширения области применения изделий из керамики. Развитие рынка *PIM* также связано с автоматизацией и оптимизацией производства, направленными на дальнейшее снижение себестоимости и отходов. В структуре себестоимости *MIM* (на примере нержавеющей стали) 10–35% составляют затраты на фидстоки, 10–15% — на операции синтеза, 5–20% — на вторичные операции, 5% — на литье, 2–5% — на дебиндинг, 2–10% — на

непрямые расходы. Ожидания связаны с появлением новых связующих, фидстоков и технологий дебиндинга, совершенствованием методик расчета характеристик литьевых форм, что в конечном счете позволит снизить объем партии, при котором достигается окупаемость. Также перспективна разработка новых технологий получения порошков на основе процессов, не связанных с плавлением.

Основные технологии

МІМ-технологии

МІМ позволяет изготавливать изделия из порошков (средний размер — 5 мкм) практически любых металлов и сплавов — стали, никеля и кобальтовых сплавов, жаропрочных материалов, сплавов на основе титана, меди. Сплавы с низкой температурой плавления (олово, бронза, цинк, алюминий) редко бывают экономически выгодны для *МІМ*. Известно более 200 базовых фидстоков, серийно выпускаемых по всему миру, и более 1000 вариантов порошковых композиций, протестированных разными компаниями и предлагаемых для *МІМ*-технологий. Основные группы материалов, из которых изготавливают изделия на основе *МІМ*-технологии:

- нержавеющие стали (аустенитные, ферритные, мартенситные, дисперсно-упрочненные, дуплексные) с пределом прочности 0,4–2,0 ГПа, прочностью на сдвиг 0,2–1,9 ГПа;
- магнитомягкие сплавы и материалы с контролируемым коэффициентом теплового расширения (сплавы железа с никелем, кобальтом) с пределом прочности 0,4–1,3 МПа, прочностью на сдвиг 0,1–1,3 ГПа;
- низколегированные (никель, кобальт) сплавы и углеродистые стали с пределом прочности 0,3–0,6 ГПа, прочностью на сдвиг 0,1–0,4 ГПа;
- имплантируемые материалы (кобальт-хром) с пределом прочности на уровне 650 МПа и прочностью на сдвиг 450 МПа;
- сплавы цветных металлов (медь, бронза).

Связующие

Выбор связующего для получения фидстока, обеспечивающего необходимые характеристики течения порошковой композиции, до сих пор считается искусством. Первое поколение связующих состояло из двух компонент — воска или смазочных компонент, теряющих устойчивость при низких температурах (обеспечивают течение композиции при формовании), и термопластичных полимеров, теряющих устойчивость при относительно высоких температурах (обеспечивают прочность отлитой «зеленой» детали). Процесс термообработки композиций на основе двухкомпонентных связующих также был двухстадийным.

Для сглаживания тепловых режимов и сокращения времени термообработки (удаления связующего) второе поколение связующих уже представляло собой многокомпонентные составы. Широко известным связующим 2-го поколения стал материал, разработанный в 1992 г. компанией *BASF* [179], состоящий из полиацетата, или полиметилэтилена (основной компонент), и небольших добавок полиолефинов. Фидсток состоял на 40–70% (по объему) из металлического порошка и на 30–60% из связующего, которое на 80–98% (по массе) состояло из полиметилэтилена и на 2–20% из нерастворимого полимера (полиэтилен, полипропилен, полистирол). Данное связующее легко, быстро и полностью удаляется в кислотном катализаторе, обеспечив 10-кратное повышение скорости процесса удаления связующего (дебиндинга).

Также известны связующие на водной основе, применяемые для материалов, не подверженных коррозии, в данном случае удаление связующего осуществляется на основе процессов вымывания. Впервые такое связующее было предложено в 1998 г. компанией *PPT (Planet Polymer Technologies)*, права на него были приобретены и доведены до рынка компанией *Ryer Enterprises LLC*. Данная технология получила название *AquaMIM*.

В дальнейшем разными компаниями было предложено несколько гибридных и альтернативных технологий получения связующих и фидстоков. В 2002 г. *AAT (Apex Advanced Techno-*

logies) запатентовала гибридную технологию связующего на основе смеси поликарбоната, этилендиаминового воска, увлажняющего агента и гуанидина. Дуальная система, состоящая из водорастворимого компонента (удаляемого первым), и компонента, удаляемого при высокой температуре, была предложена компанией *TPT (Thermal Precision Technologies)*. Компания *Honeywell* предложила связующее (*Powderflo*) на основе агара, обеспечивающее течение гелеподобной массы и достаточную прочность для формирования «зеленой» детали (технология далее была продана компании *LMT — Latitude Manufacturing Technologies*). Все эти технологии позволяют приблизить основную характеристику связующего — зависимость его массы от температуры — к так называемой идеальной *TGA*-кривой, обеспечивающей полный монотонный распад связующего в диапазоне температур от 220°C (100% масс) до 480°C (0% масс). Данная кривая является ключевой характеристикой для технологов *MIM*.

Процесс формования

В отличие от обычной РМ *MIM*-технология позволяет получать изделия сложной геометрии с высокой плотностью и прочностью проката (обычная РМ обеспечивает плотность 80–90% от теоретической, что существенно ограничивает физические свойства, достижимые для того или иного сплава). Качество изготавливаемых *MIM*-деталей помимо качества исходного сырья (фидстоков) и его компонент (порошки, связующие) определяется основными технологическими параметрами — давлением и температурой процесса (в том числе их динамикой и распределением по объему заготовки). Фактически существует нетривиальная по форме область параметров *P-T*, при которых обеспечивается получение качественных изделий.

Технологии дебиндинга

Сегодня связующие классифицируют на 3 типа по типу применения: (а) для изготовления стальных изделий; (б) для изготовления изделий из титана и титановых сплавов; (в) для изготовления керамических изделий. Для удаления связующего

из детали применяют такие методы, как осаждение или испарение растворителя в каталитической среде углерода, гептана, дихлорида этилена и др. (для композиций на основе воска, полиацетала); вымывание с последующей дистилляцией при повышенной температуре (для водорастворимых связующих); капиллярный пиролиз, или экстрагирование в контролируемой газовой среде (для *SPS*), вакуумная сублимация, сушка и отжиг (агар). Время дебиндинга варьирует в зависимости от состава и условий процесса от 4 (для систем воск—полиэтилен капиллярным методом в среде водорода) до 60 часов (для систем воск—полипропилен оксидированием в воздушной среде). Связующие на водно-гелевой основе удаляют вакуумной сублимацией при пониженных температурах за 8 ч, сушкой на воздухе — за 10 ч. Удаление полиацеталь-полиэтилена в каталитической среде паров азотной или щавелевой кислоты при температуре 150°C выполняют за 6 ч. Методы, характеризующиеся высокой скоростью процесса, как правило, неэкологичны, могут приводить к появлению дефектов типа дисторсии, растрескивания, очень требовательны к точности выдерживания температурных режимов и давления. Низкой себестоимостью процесса дебиндинга при эффективном времени процесса 6–24 часа, характеризуются водорастворимые связующие. Их отличают хорошая прочность «зеленой» детали и высокая текучесть при литье. Несколько теряют в прочности «зеленой» детали и существенно в скорости процесса (24–48 ч) связующие на основе воска (характеризуясь при этом низкой себестоимостью). Дебиндинг в кислотной среде характеризуется средней стоимостью процесса.

Порошки для МИМ

К порошкам для *МИМ* предъявляют требования в зависимости от области применения. Средний размер порошков для применения в автомобильной промышленности и в производстве потребительских товаров — 12–13 мкм; для электроники — 11,3 мкм (80% — 22 мкм), для медицины — 5 мкм (90% — 10 мкм), для микро-*МИМ* и точной механики — 2,8 мкм (90% — 5 мкм).

Оборудование для МИМ

Для получения фидстоков применяют стандартное смесительное оборудование различного типа, поставщики которого имеются во всех странах, в том числе двухкамерные смесители, плунжерные и винтовые экструдеры, миксеры планетарного типа, барабанные, роликовые, лопастные смесители.

Проектирование МИМ

Для проектирования МИМ-форм все производители применяют специализированное ПО (*Ansys, Moldex3D, Moldflow, PIMSolver, ProCAST, Sigmasoft*). Входными параметрами служат реологические свойства фидстоков, различные для разных материалов [180].

СИМ-технологии

Для изготовления изделий сложной формы из керамики применяют 2 основных процесса: литье под низким и литье под высоким давлением. НДИЛ предложено в 1950–1960 гг. в СССР. Низкое давление (0,1–1,0 МПа) при литье в дешевую алюминиевую форму обеспечивает небольшой износ формы (ресурс около 10 тыс. изделий). Фидсток представляет собой смесь керамического порошка и парафинового воска, который при температуре около 100°C течет (вязкость фидстока от 1 до 20 Па·с, температура литья 70–90°C). Форма обычно охлаждается. Дебиндинг чаще всего реализуют с помощью растворителей, после чего производят окончательное спекание. Усадка варьирует от 16% (для оксидов алюминия) до 23% (оксид циркония). Данным способом получают партии продукции от лабораторных до промышленных. Линия состоит из электроподогреваемой бочки смесителя для приготовления фидстока и модуля инжекционного литья под давлением сжатого воздуха. Лидер оборудования НДИЛ — компания *Peltsman Corp.*

ВДИЛ ориентировано на литье под давлением свыше 50 МПа, поэтому формы изготавливают из упрочненной стали или карбида вольфрама (цена формы от 5 тыс. до 25 тыс. долл.), которые выдерживают порядка 0,5 млн циклов. Фидсток для ВДИЛ имеет значительно более сложный состав, который

включает кроме воска и порошка ПАВ и термопластичные полимерные компоненты (вязкость фидстока от 100 до 1000 PaS, температура литья 120–190°C). По сравнению с НДИЛ прочность зеленой детали, получаемой при ВДИЛ, значительно выше. НДИЛ ориентировано на мелкосерийное, а ВДИЛ — на массовое производство.

Ведущие мировые производители PIM

На рынке работает около 120 основных компаний [181], из которых 50 — производители и поставщики металлических порошков и фидстоков (42% рынка), 30 — производители оборудования, т. е. машин для инжекционного формования и термического оборудования для дебиндинга и синтеза (25%), и около 40 поставщиков иных компонент (33%). На рынке присутствует еще около 100 мелких поставщиков, оказывающих минимальное влияние на рынок. В 2012 г. в отрасль были вовлечены 13800 человек (выручка 114 тыс. долл. на 1 человека в год).

Оборудование

Для большинства производителей оборудования для *MIM* последний составляет небольшую долю дохода в их суммарном бизнесе. Типовое оборудование для *MIM*-технологий аналогично оборудованию для инжекционного формования пластмассовых изделий. Основные отличия: 1) сильный износ шнеков и барабанных механизмов вследствие повышенных абразивных свойств металлических фидстоков (аналогично пластике с 30%-м наполнением нейлона) и 2) более быстрое застывание фидстока вследствие его более высокой теплопроводности по сравнению с пластмассами, что, в свою очередь, требует более высоких скоростей литья. Оборудование для каталитического дебиндинга является оригинальным для данной отрасли. Оборудование для синтеза стандартное, и его поставщики имеются во многих странах. Термическое оборудование для дебиндинга и синтеза производят в основном в Европе (около 250 компаний из 350, или 72%, расположены в Европе, 14 и 13% производителей соответственно из стран АТР и США, 1% — производители из других стран). В зависимости от тех-

нологии (типа связующего и материала) термообработку выполняют в среде водорода, азота, аргона и др. Процессы синтеза, как правило, протекают при температуре от 1000 до 1400°C, дебиндинга — при температуре от 250 до 650°C.

Основные производители оборудования для инъекционного формования: *Arburg GmbH*, *Dr-Boy* (машины инъекционного литья, *MIM*-специализированные машины), *Engel*, *Sanjo Seiki Co.*, *JSW* (машины инъекционного литья, *MIM* и *CIM*), *Goceram AB* (линии под ключ для *PIM*), *Peltsman* (машины для НДИЛ *CIM*), *Wittman Battenfeld* (основной производитель машин инъекционного литья). Микро*MIM*-технологии реализуют по 1, 2 и 3-стадийной схеме. Наиболее распространено оборудование, реализующее одностадийный *MIM*-процесс (основные производители *Arburg GmbH & Co. KG*, *Battenfeld Kunststoffmaschinen*, *Dr. Boy GmbH & Co. KG*, *Demag Ergotech GmbH*, *Engel Austria GmbH*, *Krauss-Maffei-Kunststofftechnik*, *Mitsui Machine Tools*, *Sumitomo Plastics Machinery*, *Toshiba Machine Co*). В двухстадийном процессе пластификация и инъекционное литье разделены (производители оборудования — компании *Cronoplast*, *Ettlinger*, *Ferromatic*, *Kunststoff-Zentrum Leipzig*, *Sodick Plustech*). Компания *Battenfeld* производит оборудование для 3-стадийных микро*MIM*-технологий, где операции пластификации, дозирования и инъекции разделены.

Порошки

К порошкам предъявляют следующие требования: специфическое распределение по размерам частиц, низкая цена при высокой насыпной плотности, отсутствие агломерированных частиц, преимущественно сферическая или равноосная форма частиц, достаточное межчастичное трение, чтобы предотвратить дисторсию после удаления связующего, средний размер частиц меньше 20 мкм (быстрый синтез), отсутствие пор в частицах, минимальный риск взрыва и токсичных загрязнений, чистая поверхность частиц для предсказуемого контакта со связующим.

На рынке около 60% по массе составляют стальные порошки [181]. В денежном выражении 48% рынка — нержавеющая сталь, 22% — обычные стали, 9% — вольфрам, 7% — железони-

келевые сплавы, 5% — титановые сплавы, 3% — медные и 6% — прочие сплавы. Диапазон цен на стальные порошки — от 10 до 20 долл./кг, на титановые сплавы — 200–300 долл./кг, на специфические сплавы цены могут доходить до 1000 долл./кг. В материальном выражении объем поставок MIM-порошков на мировом рынке в 2012 г. составил от 800 до 1200 т [181]. Для получения железных и никелевых порошков применяют карбонильные технологии (34% порошков получают этим методом), порошки получают также распылением металла в газовой (28%) и водной (38%) среде. Ключевые производители порошков: *Hoeganaes*, *Kobe Steel*, *BASF*, *ECKA Granules*, *GGP Metal Powder Co.*, *Shenzhen GEM High Tech Co. Ltd*, *Sumitomo* и др.

Фидстоки

Цены на основные фидстоки (сталь и т.д.) варьируют в диапазоне от 15 до 50 долл./кг. Фидстоки на основе дорогих порошков компании изготавливают непосредственно для нужд собственного производства, как правило, такие фидстоки не входят в линейку основной продукции и не поставляются сторонним организациям. Несколько крупных компаний осуществляют производство и поставки основных фидстоков:

- *Advanced Metalworking Practices* — железо, сталь, нержавеющие стали, неферромагнитные металлы и сплавы, инструментальные стали: 4600 (4650), 4100 (4140), Fe-Ni, Fe-Si, 17-4 PH, 316L, 420, 440C F-75, Mo-Cu, W-based, Ni, F-15;
- *BASF* — связующие на полимерной основе, каталитически удаляемые, железо и сталь (торговая марка *Cata-mold*): 4600 (4650), 4100 (4140), Fe-Ni, Fe-Si, 17-4 PH, 316L, 420, 440C;
- F-75, Mo-Cu, W-based, Ni, F-15;
- *Inmatec* — керамические фидстоки на основе порошков оксида алюминия (Al_2O_3) *Inmafeed K1008*, *K1010*, *K1013* и иттрий-стабилизированных циркониевых порошков (ZrO_2) *Inmafeed K1009* и *K1012*;
- *PolyMIM* — фидстоки нержавеющей стали, низколегированных сплавов, инструментальные стали, Ti и Ti-спла-

вы, медь и медные сплавы, сплавы тяжелых металлов и карбид вольфрама, кобальт;

- *Ryer, Inc.* — крупный поставщик фидстоков (производимых по технологии *AquaMIM*) типа 316L, 17-4PH, 420, 440C и др.;
- *TCK* (Доминиканская Республика) — *MIM*-фидстоки со связующими на восковой основе;
- *Zschimmer & Schwarz Inc.* — фидстоки основных и тяжелых металлов, керамические порошки (торговая марка *Elutec*).

Прочие поставщики

В формировании рынка *MIM* участвуют также производители ингибиторов коррозии (*Binder GmbH, Memmert GmbH, Bertoma*) для компаний, применяющих водные технологии дебиндинга.

Для обеспечения контроля качества *MIM*-технологий применяют измерители плотности, твердости (по Роквеллу, Виккерсу), анализаторы углерода, кислорода, азота, капиллярные реометры, измерители шероховатости, машины для испытаний на растяжение, анализаторы состава, сканирующие электронные микроскопы. Для проверки готовых изделий на предмет наличия внутренних пор и трещин применяют акустическое оборудование и микрофокусные рентгеновские аппараты.

Общая характеристика рынка

В 2012 г. глобальный рынок *MIM*-технологий [181] составил 1,51 млрд долл. с прогнозом роста к 2018 г. до 2,88 млрд долл. Географически 47% рынка (702 млн долл.) локализовано в странах Азии, 21% — в Европе и 26% — в Северной Америке. Прогнозный темп роста рынка в ближайшие 5 лет составляет 11,4%, в том числе по регионам — 54% в Азии (*CAGR* 14%), падение до 18% (*CAGR* 8,5%) в Европе и до 22% в Америке (*CAGR* 8,3%) с увеличением до 6,1% (*CAGR* 12,1%) в оставшейся части мирового рынка.

Ожидается, что по сравнению с последними тремя годами темпы роста рынка (15%) слегка замедлятся, что связано прежде всего с тотальным замедлением роста ВВП и макроэкономическими неопределенностями. При этом, скорее всего, ры-

нок *MIM* Европы и США по-прежнему будет расти существенно более высокими темпами, чем ВВП этих стран.

Два крупнейших участника рынка (*ARC Group* и *Indo-US MIM* — самый крупный игрок) пересекли отметку по объемам продаж *MIM*-продукции 50 млн долл. Ожидается, что к 2018 г. их доля превысит 100 млн долл., а 50-миллионный рубеж пересекут от 5 до 10 компаний [181]. Наиболее перспективный сегмент — рынок огнестрельного оружия (пистолеты, револьверы, винтовки). По данным *EPMA* 2013 г., объем продаж изделий, полученных по технологии *MIM*, в Европе превысил 250 млн евро.

Малые и средние компании работают преимущественно на покупных фидстоках, не вкладывая средства в НИОКР по их разработке. Крупные компании, преследуя цели экономической независимости, работают в основном на фидстоках собственной разработки.

Ведущие производители PIM

В мире около 400 компаний, работающих в области *MIM*-технологий [181], в том числе 106 в США, 69 в Китае, 41 в Германии, 38 в Японии, 17 в Тайване, 14 в Корее, 12 в Швейцарии. Это не является прямым показателем *MIM*-активности, так как, например, в Индии всего 3 компании, но с весьма приличным оборотом и перспективами роста (крупнейшая в мире компания *Indo-US MIM* с объемом продаж 70 млн долл. и ожидаемыми темпами роста 40%). Максимальный рынок *MIM* в финансовом измерении — США (388 млн долл.), далее — быстрорастущий рынок Китая (364 млн долл.), рынок Европы — 319 млн долл. (в том числе 108 млн долл. — Германия, 48 млн — Испания, 67 млн — Швейцария). Рынок Бразилии составляет 40 млн долл., Индии — 72 млн, Японии — 116 млн долл. Кумулятивный рынок остальных стран (Россия, Малайзия, Австралия, Канада, Турция, Израиль) составляет 197 млн долл.

Лидеры *MIM*-рынка — *Acelent Technologies Pte Ltd.*, *Advanced Materials Technologies Pte Ltd.*, *SolidMicron Technologies Pte Ltd.* (Сингапур), *Changzhou GIAN Technology Co. Ltd.*, *Zhejiang Yihuo Tech Co., Ltd.* (Китай), *Ecrimesa* (Испания), *Epson Atmix Corp.* (Япония), *Indo-US MIM* (Индия), *Schunk Sintermetalltechnik* (Гер-

мания), *Taurus* (Бразилия), *ARC Group*, *Parmatech Corp.*, *Kinetics Climax, Inc.*, *Smith Metal Products*, *Dynacast* (США).

В сегменте *CIM*-рынка ведущую роль играют немецкие компании *Rauschert*, *Microceram*, *MKS* и *Sembach*, кумулятивно объемы продаж этих компаний составляют 45 млн долл. Лидеры *CIM*-рынка, применяющие ВДИЛ и НДИЛ, — *CoorsTek*, *Horn*, *Morgan Advanced Ceramics*, *Circle C*. Существенным фактором, влияющим на развитие *CIM*, служит производство керамики (30% рынка *CIM*) и развитие керамической промышленности (лидеры — *Alcoa*, *Carpenter Technology* и *Precision Castparts*). Ведущие компании в области *CIM* — *Avignon Ceramic SAS*, Франция, *B&B Refractories, Inc.*, США, *Capital Injection Ceramics*, Великобритания, *Core Tech*, *Mentor*, США, *Freeman (Japan) Co., Ltd.*, Япония, *Itochu Ceratech Corp.*, Япония, *Orton Ceramic*, США.

Общие тенденции развития рынка PIM

Рынок *MIM* растет быстрее *PM* и значительно быстрее мирового ВВП. Технология *MIM* в стадии роста. На рынке работают преимущественно частные компании, известно лишь незначительное число публичных компаний. Для основания *MIM*-компании в странах Европы и США необходимо 6 млн долл. инвестиций, в странах Азии существенно меньше. Эта ситуация привлекательна для участников рынка смежных отраслей (литье пластмасс, *PM*, резины и связующие, производители порошков), а также конечных пользователей (медицина, стоматология, автомобильная и оружейная промышленность). Однако многие компании, вошедшие на рынок, спустя несколько лет прекращают бизнес, так как данная отрасль предъявляет особые требования к уровню компетенций и опыта. Участников рынка привлекают возможности расширения производства, в том числе за счет применения новых материалов и процессов и их комбинаций, ограничений и возможностей, свойственных каждому конкретному методу. *CIM* и *MIM* представляют совершенно разные технологические процессы. Рынок *MIM* будет в среднем расти в течение ближайших двух десятилетий. Инструментом его стимулирования будет образовательная деятельность компаний и убежде-

ние конечных потребителей перейти на новые технологии. По мнению экспертов, существенный потенциал рынка скрывается в систематическом подходе к маркетингу.

Исходные географические рынки *MIM* ориентировались на стоматологию и автомобильную промышленность США. Мировой кризис 2008–2009 гг. привел к обвалу рынка автомобилестроения, к банкротству или поглощению компаний, специализировавшихся на *MIM*-технологиях для данного сегмента. Крупные компании диверсифицировали свой бизнес в другие отрасли (медицина, стоматология, авиакосмическая отрасль, электроника, телекоммуникации, производство украшений). В последнее десятилетие бум на рынке сотовых телефонов стимулировал производство *MIM* и привел к перемещению мощностей в страны Азии, где сосредоточено производство электроники.

Тиксоформинг (магниевого сплавы)

Перспективным трендом в области *MIM*-технологий считается тиксоформинг изделий из магниевых сплавов. Магний является 8-м по распространенности в земле элементом, что не создает ограничений в связи с его недостатком, как с алюминием, при этом он на 65% легче алюминия и обладает высокой удельной прочностью. Рост производства магниевых сплавов сдерживается его низкой ударной вязкостью, низкой коррозионно- и трещиностойкостью, высокой хрупкостью по сравнению со сталью. Это обусловлено гексагональной кристаллической решеткой магния, которая по сравнению с ОЦК- или ГЦК-структурой железа характеризуется низкими упругими свойствами. Легирование алюминием и цинком (сплав *AZ91D*) позволило увеличить предельную деформацию при растяжении до 12% и предопределило широкое применение в течение 20 последних лет. Японская группа компаний *USPTO* запатентовала (патент США 8,333,924) магниевый (97%) сплав с лигатурами РЗЭ, в котором при пластической деформации формируются длиннопериодические структуры, обеспечивающие высокую ковкость и ударную вязкость материалу. Этот материал перспективен для изготовления корпусов сотовых телефонов, ноутбуков и т. д. методом тиксофор-

мования. По сравнению изделиями из магниевых сплавов, получаемых традиционным литьем, инжекционное формование позволяет получить изделия с улучшенными механическими характеристиками. Например, сплав *AM50A* (Al — 5%, Mn — 0,3–0,5%) полученный тиксоформингом при температуре 625°C (скорость формования 1,4 м/с), обладает сдвиговой прочностью 140 МПа (по сравнению с 112 МПа для обычного литья под давлением при температуре 690°C, скорости формования 2,9 м/с), предельным растяжением 269 МПа (232 МПа для *DC*) и предельной деформацией при растяжении 20% (по сравнению с 13% *DC*). Такие свойства современных магниевых сплавов формируют емкую нишу на рынке *MIM*-изделий. Компания *Thixomat* лицензировала технологию формования магниевых сплавов двум производителям оборудования для инжекционного формования — *JSW* (Япония) и *Husky* (Канада). Компания *Dynacast* адаптировала технологию множественного сдвига (2–5 тыс. циклов в час) к *MIM*, после чего была приобретена компанией *Technimire* (Канада). Аналогичными компетенциями обладает китайская *T-SOK Co. Ltd*. В странах ЮВА работает ряд компаний, изготавливающих корпуса сотовых телефонов и ноутбуков из магниевых сплавов методом инжекционного формования.

Титановые сплавы

Другим нишевым рынком для *MIM* выступает рынок изделий из титановых сплавов, сосредоточенный в основном в высокотехнологичном сегменте. Титан плохо поддается механической обработке, что раскрывает интересные возможности для *MIM*-технологий. Порошки титана по методу Кролла имеют размер от 50 до 180 мкм. Для получения *MIM*-изделий из *Ti-6Al-4V* показана эффективность связующих на основе полиэтилена и этилен-винил-ацетата, парафинового воска. Недавние исследования Центра Гельмгольца (Германия) продемонстрировали процесс получения порошков титана размером от 18 до 27 мкм. Основные области применения изделий из титановых сплавов:

- авиакосмическая промышленность. Основной сплав — *Ti-6Al-4V* (высокопрочный многоцелевой). Для изготов-

ления деталей двигателей применяют трещиностойкие и коррозионностойкие сплавы $Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo$ и $Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo$, для изготовления пружинных механизмов — $Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo$, посадочные механизмы — кованый сплав $Ti-10V-2Fe-3Al$, листовой $Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al$, трубопроводы $Ti-1Al-2.5V$, рамы и элементы двигателя $Ti-4Al-4Mo-2Sn$;

- медицина. Для изготовления протезов суставов, деталей имплантатов, челюстно-лицевых имплантатов, хирургических инструментов, элементов дефибрилляторов, кардиостимуляторов, стентов. Применяют сплавы $Ti-6Al-4V$, $Ti-6Al-7Nb$, $Ti-5Al-2.5Fe$, $Ti-13Nb-13Zr$, $Ti-12Mo-6Zr-2Fe$. Титановые сплавы обладают хорошей биосовместимостью, остеогенезом костной ткани, лучшей совместимостью упругих характеристик с костной тканью.

Танталовые сплавы

Танталовые порошки применяют для изготовления ММ-изделий с высокими прочностными свойствами, ударной вязкостью, коррозионной стойкостью, используют в баллистике, при производстве хирургических имплантатов, режущего инструмента, акустических фильтров и оптической аппаратуры.

Магнитные сплавы

ММ-технологии применяют для изготовления магнитных изделий сложной формы из никелевых сплавов (тороидальные остовы для трансформаторов тока, дифференциальные переключатели тока, элементы шаговых двигателей, электроклапанов, статоров, дросселей и т. д.). В 2012 г. компания *Hitachi* разработала электрический мотор на постоянных магнитах из аморфных магнитных материалов, содержащих неодим и диспозий.

МикроММ

Одним из наиболее перспективных рынков ММ становится рынок изделий сложной формы весом 1 г или меньше (100, 50 мг) для миниатюрных машин (компания *Maxon Motors* — лидер по изготовлению таких устройств), медицинских и хирур-

гических инструментов, часов, ювелирных изделий. Некоторые изделия имеют геометрические размеры элементов в несколько микрон, способные сохранять работоспособность длительное время и обладающие достаточной прочностью. Компания *Sandvik Osprey* специализируется на изготовлении порошков для микроММ-технологий (к таким порошкам предъявляют наиболее жесткие требования — средний размер 2,8 мкм; 90% — до 5 мкм). Тренд основан на снижении доли стоимости материалов в структуре себестоимости ММ-технологий, которая приблизилась к таковой для традиционных производственных технологий. МикроММ-рынок станет ключевым сегментом для новых сплавов и материалов уже в течение ближайших лет. Аналогичный бурный рост ожидают и в ММ-технологиях биметаллических изделий, а также ММ-технологиях для медицины. Это будет вызвано спросом в таких отраслях, как биосенсоры, микрореакционные наборы, миксеры, микродвигатели и микросистемные технологии.

Мультимодальные порошковые композиции

В последнее десятилетие основные тенденции исследований, направленных на повышение физико-механических характеристик РМ-изделий, связывают с подбором модификаторов порошковых композиций [182, 183–186], в том числе ультрадисперсных. В ряде научных работ, выполненных российскими и зарубежными учеными [180, 181, 187–190], показана возможность повышения ударной вязкости литых изделий на 30% и более за счет добавления в расплав порошковых, в том числе нанопорошковых, модификаторов. При этом одновременно показано повышение показателей предела прочности (временного сопротивления разрыву) около 10%. В ряде публикаций [183–186] показано, что использование бимодальных порошков субмикронного и нанометрового размера для изготовления фидстоков приводит к заполнению наночастицами пространства между частицами большего размера, снижению температуры спекания, достижению практически полного уплотнения в процессе спекания и как следствие к существенному уменьшению пористости конечного изделия и росту его физико-механических свойств, например ударной

вязкости. В частности, спекание смеси субмикронных металлических частиц с наночастицами (до 5% масс) приводит к измельчению зерен металла конечного изделия, что увеличивает его ударную вязкость. Известны исследования [191], указывающие на то, что спекание наночастиц происходит при температурах существенно ниже температур плавления компактного металла. Спекание некоторых нанопорошков происходит с выделением энергии, саморазогревом частиц, ростом локальной температуры и интенсификации спекания [178, 192]. Однако, в отличие от технологий металлургического и литейного производств, данные исследования носят несистематический характер. Процессы образования связей и влияние химического состава порошковых композиций на физико-механические и технологические показатели изделий исследованы лишь частично и для некоторых типов компонент. Все это свидетельствует о неизученных возможностях создания технологии прецизионных изделий сложной геометрии, обладающих повышенными характеристиками ударной вязкости, прочности при экстремальных температурах и имеющих конкурентоспособную себестоимость.

3. Зарубежный опыт государственной поддержки развития новых производственных технологий

Формирование НРТ как нового технологического приоритета в начале посткризисного этапа (2010–2012 гг.) развития мировой экономики было актуально прежде всего для развитых стран, стремившихся за счет внедрения НРТ ликвидировать наметившиеся потери в конкурентоспособности отечественной промышленности. Наиболее известные и проработанные программы поддержки развития НРТ в настоящее время реализуются в США, Великобритании и Германии. В этих странах меры поддержки развития новых производственных технологий действовали и ранее. Вновь возникшие инициативы, по сути, встраивались в существующую систему инструментов, учитывали имеющийся опыт и были направлены на устранение выявленных ранее проблем (например, недостаточности поддержки на поздних стадиях разработки новых технологий). Наиболее примечательными в названных странах стали: в США — Партнерство в области перспективных производственных технологий (*Advanced Manufacturing partnership*), в Великобритании — созда-

ние катапульт-центров и, в частности, формирование катапульты в области обрабатывающих производств с высокой добавленной стоимостью (*High Value Manufacturing Catapult*), в Германии — программа «Индустрия 4.0».

3.1. СОВРЕМЕННАЯ ПОЛИТИКА США ПО РАЗВИТИЮ НПТ

История формирования федеральной политики США в сфере НПТ

Современная американская политика в сфере новых производственных технологий берет начало в 2011–2012 гг. Как отдельное направление она была официально заявлена Б. Обамой в 2012 г. в Послании о положении страны [193]. К середине 2013 г. были сформулированы основные направления и инструменты политики.

Внимание к НПТ было обусловлено главным образом необходимостью экономического восстановления США после рецессии, решения проблем занятости, а также выхода на новый цикл экономического развития — устойчивого в экологическом и экономическом отношениях.

Приоритеты и направления новой политики были определены по результатам интенсивного диалога с представителями бизнеса, науки, промышленности, потенциальными потребителями (в том числе с использованием инструментов краудсорсинга) и внутренних дискуссий в администрации. В целом они соответствовали оценкам экспертного сообщества о развитии НПТ [194, 195].

После формирования базовой концепции будущей политики для ее доработки и координации Белый дом в июне 2012 г. образовал Партнерство в сфере передового промышленного производства (*Advanced Manufacturing Partnership, AMP*) — консультативный орган, состоящий из представителей:

- ключевых федеральных ведомств, ответственных за поддержку научно-технологического и инновационного развития США (Министерство торговли в лице Национального института стандартов и технологий (НИСТ), Минэнерго, Минобороны США, НАСА, Национальный научный фонд (ННФ)), а также национальных лабораторий;

- крупнейших американских корпораций (*Dow Chemical, Allegheny Technologies, Caterpillar, Corning, Ford, Honeywell, Intel, Johnson & Johnson, Northrop Grumman, Procter & Gamble* и проч.);
- ведущих университетов (Массачусетский технологический институт — МТИ, Технологический университет Джорджии, университеты Карнеги Мелон, Стэнфордский, Беркли, университеты Калифорнии и Мичигана).

Впоследствии, в 2013 г., примерно теми же участниками был создан Рабочий комитет 2.0 по партнерству в сфере передового промышленного производства [196], получивший статус рабочей группы *PCAST*¹ и призванный осуществлять координацию мероприятий и ряд иных организационно-методологических функций. Финансирование Комитета 2.0 составляло до 4 млн долл. в год.

Общая композиция федеральной политики США в сфере НПТ

Все мероприятия политики Б. Обамы в сфере НПТ можно разделить на несколько направлений. Прежде всего это новые профильные межведомственные инициативы:

- мероприятия в сфере собственно производственных технологий, иницируемые и координируемые Национальным программным офисом в сфере передового производства (*Advanced Manufacturing National Program Office, AMNPO*), функционирующим на базе НИСТ. Формально является общей координирующей структурой также в отношении всех нижеприведенных инициатив;
- Инициатива генома материалов [197]² (*Materials Genome Initiative*) — государственно-частное партнерство, ини-

¹ *PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology)* — Совет при президенте по науке и технологиям.

² Инициатива не направлена исключительно на биотехнологические материалы. Название предполагает символическое сравнение развития новых технологий разработки материалов с развитием клеток из «кода» ДНК.

цированное в 2011 г. и координируемое аппаратом администрации;

- Национальная инициатива в сфере робототехники (*National Robotics Initiative*) — координировалась ННФ.

На ведомственном уровне эти инициативы дополнялись группой новых технологических, организационных и иных мероприятий Минэнерго, Минобороны США, в том числе Агентства передовых оборонных исследовательских проектов (*DARPA*), Минторга, Минсельхоза США, а также по ряду направлений национальных институтов здравоохранения (НИЗ ответственны за финансирование и проведение биомедицинских НИОКР).

Особенность перечисленных мер состояла в том, что они имели децентрализованный характер. Это в целом соответствует системе поддержки НИОКР в США. Поэтому различные собственные мероприятия ведомств относились на реализацию той или иной инициативы при общей координации со стороны головного ведомства. При этом могла возникать ситуация дублирующего отнесения того или иного мероприятия на счет разных инициатив.

Мероприятия Национального программного офиса в сфере передового производства (AMNPO)

Не считая отдельных конкурсов на разработку технических решений в сфере НППТ, ключевым направлением деятельности *AMNPO* является создание Национальной сети по развитию производственных инноваций (*National Network for Manufacturing Innovation, NNMI*) [198], о которой впервые было объявлено в марте 2012 г. в выступлении Б. Обамы.

Сеть представляет группу взаимосвязанных институтов-хабов промышленных инноваций, объединяющих усилия промышленности, университетов, колледжей, федеральных ведомств и местных органов власти на региональном уровне. Организатором института должна быть бесприбыльная организация (традиционная модель для национальных лабораторий и кооперативных центров НИОКР, призванная нивелиро-

вать фактор «частных» интересов отдельных компаний), а в его задачи входят [199]:

- организация и поддержка прикладных исследований, призванных заполнить «провалы» между достижениями науки и доработкой технологий до стадии промышленной готовности, а также обеспечить рост сопутствующих — поддерживающих — инноваций;
- выведение технологии на стадию промышленного производства и обеспечение поддержки процессов ее доработки/внедрения (так называемая стадия 7–9 технологической готовности);
- обеспечение условий подготовки профильных кадров с различными компетенциями (НИОКР, технологические и производственные работы и др.) по профилю института с участием не только университетов, но и двухлетних колледжей, готовящих техников;
- создание инфраструктуры коллективного пользования в сфере своей компетенции в части как оборудования, так и баз данных с акцентом на малый и средний бизнес;
- поиск и привлечение/объединение заинтересованных стейкхолдеров.

Особенность институтов — акцент на сетевой характер НИОКР и требование выхода на полную самоокупаемость через 5–7 лет (т. е. прекращение госфинансирования, что с формальной точки зрения должно подтвердить правильность выбора технологий и повысить коммерческий фокус работ).

Всего предполагается создать до 45 институтов, ядром должны стать 15 институтов. Согласно итоговым решениям, различные федеральные министерства должны выделить на функционирование одного института до 75 млн долл. на 3 года при наличии как минимум сопоставимой поддержки со стороны консорциума участников института в форме финансовой поддержки или имущественного взноса (в том числе лабораторной и производственной базы, зданий и т. д.).

При отборе заявок ведомствами учитывается целая группа факторов: возможности и перспективы развития, наличие нового капитального оборудования или потребности в нем,

влияние на формирование производственных цепочек, подготовка кадров, влияние на научно-технологические и производственные позиции США по направлению, связь с иными федеральными программами и американскими центрами компетенций и т. д.

В конце 2012 г. было выделено 30 млн долл. на создание первого института *NNMI* — Национального института по инновациям в сфере аддитивных производств в Янгстауне, Огайо (впоследствии официально переименован в «Америка делает» — *America Makes* [200]).

Организатором конкурса на создание института выступило Минобороны США. Победителем стал консорциум производственных компаний, университетов, колледжей и бесприбыльных организаций Огайо, Пенсильвании, Западной Виргинии (так называемый метарегион *Tech Belt*), предоставивший дополнительные 40 млн долл. Лидером консорциума стал бесприбыльный Национальный центр по оборонному производству и машиностроению (*NCDMM*).

Надо сказать, что создание *America Makes* выявило определенные проблемы. Например, в ходе конкурса Минобороны США получило заявки от 13 консорциумов, в итоге же все компании и университеты, участвовавшие в конкурирующих заявках, в той или иной форме присоединились к проекту. За счет этого общее число организаций-участников и партнеров института превысило 80 [201]. Это можно рассматривать, с одной стороны, как акцент на кластерном и сетевом аспекте развития института, с другой — как свидетельство не до конца проработанных стратегии и подходов, а также ожидаемых сложностей управления институтом.

В течение 2013 г. было создано два института [202, 203]:

- по инновациям в сфере цифрового производства и [промышленного] дизайна (*Digital Manufacturing and Design Innovation, DMDII*). Инициатор — Министерство обороны США. Финансирование на 3 года — 50 млн долл. от Минобороны, 20 млн долл. от прочих федеральных агентств со 100%-м софинансированием со стороны частных источников;

- по инновациям в сфере производства легких и современных металлов (*Lightweight and Modern Metals Manufacturing Innovation, LM3I*). Инициатор — Министерство обороны США. Финансирование на 3 года — 50 млн долл. от Минобороны США, 20 млн долл. от прочих федеральных агентств.

В 2014 г. появился еще один институт — в сфере силовой электроники нового поколения. Инициатором выступило Минэнерго США.

Анализ федеральной политики в сфере НПТ

В содержательном отношении наиболее значимыми являются следующие особенности федеральной политики США в сфере НПТ:

- ставка на комплексное развитие серии смежных направлений: собственно процессных инноваций по созданию физических объектов, новых материалов, новых ИТ-систем, «новой» робототехники (на перспективу);
- комплексность применяемых инструментов и охвата проблем — от лаборатории до предприятия;
- акцент на сетевых и кластерных инициативах.

Иными словами, политика направлена на максимальное повышение эффективности использования существующих ресурсов всех участников инновационной системы.

Однако в организационном отношении политика США в сфере НПТ демонстрирует, с одной стороны, несколько избыточную сложность и неоднозначность, с другой — «лоскутный» характер, наличие по сути дублирующих мероприятий. Платой за подобного рода подход служит очевидное снижение эффективности координации.

Исторически подобный подход, а также опыт каждого из указанных ведомств по отдельности имеют положительный пример реализации прорывных проектов (Минобороны США — сверхзвуковые и космические технологии, Интернет

и т. д., Минэнерго — ядерный проект, расшифровка генома человека и др.), однако требуют сильного спонсора (финансового и политического) процесса развития НПТ.

В настоящий момент сложно судить об эффективности и результатах недавно принятых мер федерального правительства — инициатива АМР только в самом начале реализации и ежегодно административные подходы корректируются. Вместе с тем умеренно высокий интерес промышленности и академического сектора к политике администрации говорит о релевантности государственных мер. Однако даже на уровне правительства фиксируется потребность в росте координации усилий и связанности политики в целом.

Наконец, остается вопрос формирования спроса на НПТ. В настоящее время в рамках политики Б. Обамы наблюдается почти полное отсутствие прямых мер по поощрению спроса на НПТ. С формальной стороны это связано не только с бюджетными ограничениями, но и со ставкой на технологические решения в области производственных процессов, а не конечной продукции, что в принципе не предполагает в реалиях американской политики специальных мер поддержки.

3.2. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ИННОВАЦИОННАЯ ПОЛИТИКА В ОБЛАСТИ ПОДДЕРЖКИ РАЗВИТИЯ НПТ В ВЕЛИКОБРИТАНИИ

Общая характеристика современного состояния развития науки, технологий и промышленности

Великобритания традиционно считается одной из наиболее успешных стран в области развития науки и технологий. При численности населения менее 1% мирового на Великобританию приходится почти 16% наиболее цитируемых публикаций в мире [204], а из 10 ведущих мировых университетов 3 университета находятся в Великобритании [205].

В то же время для Великобритании характерна проблема практического применения результатов НИОКР. Подобное сочетание сильной научной базы и слабой восприимчивости к инновациям в промышленности («европейский парадокс»)

приводит к тому, что результатами научных открытий британских ученых все больше пользуются зарубежные компании¹.

Место НПТ в системе государственных технологических приоритетов

В Великобритании НПТ не выделяются в качестве отдельного приоритета технологического развития, специальные инструменты государственной политики, направленные на развитие именно НПТ, также отсутствуют.

В то же время в британской инновационной политике есть понятие, максимально близкое к тому, что принято считать перспективными производственными технологиями. Это обрабатывающие производства с высокой добавленной стоимостью (*high value manufacturing — HVM*). Для развития *HVM* используются те же инструменты инновационной политики, что и для остальных направлений, обозначенных в качестве приоритетных на государственном уровне.

Проблемы механизмов государственной инновационной политики

Дистанцирование британского правительства от промышленной политики, начавшееся еще во времена М. Тэтчер, и дефицит общенациональных стратегий привели к тому, что в Великобритании в 2000-е гг. действовало большое количество разнообразных технологических центров, технопарков, центров трансфера технологий и т.п., при этом их финансирование в значительной степени возлагалась или на сам бизнес, или на региональные органы по поддержке инноваций.

В результате, несмотря на формирование отдельных успешных инновационных центров, в целом система поддержки

¹ Так, в Великобритании доля финансирования НИОКР за счет иностранных источников в 2012 г. достигала 0,34% ВВП, что существенно превышает аналогичные показатели других развитых стран.

трансфера знаний и технологий из науки в промышленность в Великобритании в 1990–2000-х гг. характеризовалась отсутствием долгосрочного базового финансирования и стратегии развития и распылением средств. Это приводило к проблемам во взаимодействии с бизнесом и как следствие к трудностям коммерциализации технологий в Великобритании [206].

Показательным примером служат центры, образованные в рамках Сообщества Фарадея (*the Faraday Partnership*) в 1990-х гг. Идея создания Сообщества Фарадея опиралась на модель институтов Фраунгофера в Германии, однако на практике существенно от них отличалась. В частности, в правительстве не было найдено средств на обеспечение базового финансирования центров Фарадея и им приходилось полагаться только на конкурсное грантовое финансирование. Однако, поскольку центры Фарадея были нацелены на помощь промышленности в прикладных околорыночных исследованиях, возникали существенные сложности с получением грантов, которые ориентированы в первую очередь на фундаментальную науку [207].

Другой пример — опыт развития сети наноцентров: на создание 32 центров нанотехнологий было выделено 50 млн ф. ст., что было прокомментировано экспертами как абсолютно недостаточная сумма для создания критической массы усилий [208].

Текущие изменения государственной политики в области технологического развития

Мировой экономический кризис 2008–2009 гг. стал толчком к существенному пересмотру государственной политики как в научной сфере, так и в области промышленной политики Великобритании.

Во-первых, глубоким изменением стало возрождение активной промышленной политики, проводимой британским правительством. В 2009 г. был опубликован доклад «Новая промышленность, новые рабочие места» [209], в котором отмечалась необходимость усиления государственной промышленной политики для формирования и реализации стратегического видения развития британской экономики. Вслед

за докладом в 2009 г. был образован единый Департамент бизнеса, инноваций и компетенций (*BIS*)¹, который объединил функции по развитию науки, инноваций и промышленности.

Во-вторых, государственная политика в области поддержки трансфера знаний и технологий из университетов в промышленность стала изменяться в сторону концентрации имеющихся ресурсов на национальных приоритетах.

В 2010 г. в широко распространенном и одобренном правительством докладе Х. Хаусера «Текущая и будущая роль центров технологий и инноваций в Великобритании» [210] фактически было повторено предложение опереться на модель германских институтов Фраунгофера и создать центры технологий и инноваций.

По мнению Хаусера, такие центры должны стать мостом между наукой и промышленностью, обеспечивая поддержку более поздним этапам исследований и разработок по сравнению с этапами, поддерживаемыми в университетах.

В приведенном в докладе Хаусера анализе [210] существовавших до этого в Великобритании подобных центров отмечены основные проблемы их функционирования:

- краткосрочный горизонт бизнес-модели центров (около 3 лет);
- распыление финансирования — низкий уровень финансирования большинства центров, что не позволяло достичь необходимого порогового уровня эффективности;
- отсутствие координации формирования подобных центров на национальном уровне и слабая интеграция их в общую национальную технологическую стратегию.

Для координации поддержки инноваций на национальном уровне в правительстве в 2010 г. было принято решение, с одной стороны, прекратить деятельность агентств по региональному развитию (*RDA*) (*RDA* являлись одним из ключевых источ-

¹ Создан на базе Департамента инноваций, университетов и компетенций (*DIUS*) и Департамента бизнеса, предпринимательства и регуляторных реформ (*BERR*).

ников финансирования центров технологий и инноваций), с другой — передать часть их функций национальному агентству по инновациям — Комитету по технологической стратегии¹ (*TSB*) и существенно расширить финансирование *TSB*.

Инструменты государственной политики в области НПТ

Объединение в *BIS* функций по поддержке исследований и промышленной политики позволило ему комплексно подойти к реализации планов технологического развития.

1) Координация бизнеса и государства

BIS совместно с бизнесом подготовил стратегии развития приоритетных отраслей (или секторов), формируя таким образом общее долгосрочное видение их развития. В рамках этих стратегий рассматривались такие специфические для каждой отрасли темы, как технологии, компетенции, доступ к финансированию, государственные закупки/поддержка производственной цепочки.

Наиболее близкими к тематике *HVM* являются стратегии развития аэрокосмической и автомобильной промышленности, хотя пересечение по тематике также имеется со стратегией атомной энергетики, ветряных офшорных электростанций и др.

В рамках отраслевых стратегий в области аэрокосмической промышленности и автомобилестроения *BIS* организовал взаимодействие с бизнесом посредством определенной формы консорциума или отраслевого объединения², управляемого совместно представителем *BIS* и промышленных компа-

¹ *Technology Strategy Board (TSB)* — государственный орган, не входящий в структуру правительственных департаментов и управляемый бизнес-сообществом, являющийся главным каналом реализации государственных инициатив в области инноваций. Основным источником финансирования *TSB* служит *BIS*.

² Например, *Aerospace Growth Partnership* в аэрокосмической отрасли, *Automotive Council* в автомобильной отрасли.

ний. Роль подобных отраслевых объединений заключается, с одной стороны, в формировании общего стратегического видения развития отрасли у бизнеса и государства (в том числе подготовка дорожных карт, изменение условий ведения бизнеса и т. д.), с другой — в координации усилий по разработке новых технологий.

В аэрокосмической и автомобильной отраслях под эгидой отраслевых объединений были созданы также специальные организации для финансирования и координации исследовательских проектов:

- Аэрокосмический технологический институт (*Aerospace Technology Institute*) с объемом суммарного финансирования около 2 млрд ф. ст. на 2013–2020 гг.;
- Центр перспективных силовых установок (*Advanced Propulsion Centre*) с объемом суммарного финансирования около 1 млрд ф. ст. на 10 лет.

2) Развитие исследовательской инфраструктуры

Для развития исследовательской инфраструктуры через *TSB* была запущена программа сети катапульт — центров, создаваемых на базе университетов, в которых сконцентрированы передовое исследовательское оборудование мирового уровня и ведущие исследователи.

В настоящее время сформировано 7 катапульт (еще 2 катапульты планируется создать в 2014–2015 гг.), работающих в следующих областях:

- 1) обрабатывающая промышленность с высокой добавленной стоимостью;
- 2) клеточная терапия;
- 3) подключенная (*connected*) цифровая экономика;
- 4) города будущего;
- 5) офшорная возобновляемая энергетика;
- 6) спутниковые системы и их применение;
- 7) транспортные системы;
- 8) энергетические системы (в 2014–2015 гг.);
- 9) диагностика и доказательная медицина (в 2014–2015 гг.).

Отбор тематики катапульта проходил по следующим 5 критериям:

- 1) потенциальный объем мирового рынка в области специализации катапульты прогнозируется в размере не менее 1 млрд ф. ст. в год;
- 2) Великобритания должна лидировать в мире в исследованиях по тематике катапульты;
- 3) бизнес должен иметь возможность коммерциализировать технологии и сформировать в Великобритании значительную часть производственной цепочки в области специализации катапульты;
- 4) катапульта должна обеспечивать привлечение в Великобританию ТНК;
- 5) катапульта должна помогать достигать национальных стратегических целей.

Финансовая модель катапульт предполагает следующее распределение источников финансирования:

- 1/3 — базовое финансирование со стороны *TSB*;
- 1/3 — конкурсное финансирование совместных прикладных исследований со стороны государственного и частного секторов;
- 1/3 — контракты с промышленностью на НИОКР.

На такую структуру финансирования катапульты должны выходить в течение 5 лет. В случае недостижения целевых показателей по привлечению средств со стороны бизнеса катапульты через 5 лет с начала работы может быть закрыта.

Предполагается, что годовой объем финансирования одной катапульты будет составлять порядка 30–45 млн ф. ст. из всех источников. Общий объем финансирования катапульт в течение 5 лет планируется на уровне порядка 1,4 млрд ф. ст. [211].

Согласно обзору британской организации по лоббированию бизнеса *CBI* от 21 июля 2014 г. [212], из 7 сформированных катапульт только одна катапульта — в области обрабатывающей промышленности с высокой добавленной стоимостью — начала работать в полную силу.

Катапульта в области обрабатывающей промышленности с высокой добавленной стоимостью (*HVM*) была образована в 2011 г. на базе 7 уже существовавших центров при университетах. Таким образом, *HVM*-катапульта является сетевым инструментом, что обеспечивает ее дополнительную привлекательность для бизнеса. В настоящее время *HVM*-катапульта активно сотрудничает с такими компаниями, как *Rolls-Royce*, *Airbus*, *Jaguar Land Rover* и др. Со стороны государства запланированы инвестиции в размере около 140 млн ф. ст. в течение 6 лет.

За исключением *HVM*-катапульти, результаты работы которой оцениваются достаточно высоко [213], остальные центры до настоящего времени так и не начали работать на полную мощность, что закономерно вызывает вопросы об эффективности этого инструмента. Для ответа на вопрос об эффективности катапульта в марте 2014 г. началась подготовка нового обзора Хаусера [214], которая к настоящему времени еще не завершена.

В то же время другие источники уже подчеркивают слабые связи прочих катапульти с университетами, непрозрачные процедуры выбора приоритетов, места локализации катапульти и т. д. [215].

3) Поддержка МСП и производственной цепочки

В целях развития предприятий, входящих в производственные цепочки в приоритетных отраслях, правительство Великобритании в 2012 г. запустило Инициативу по поддержке производственной цепочки в перспективной обрабатывающей промышленности (*AMSCI*) с объемом финансирования 125 млн ф. ст. в 2012 г. и 120 млн ф. ст. в 2013 г. [216] (в форме грантов и субсидирования кредитов, которые могут быть направлены на закупку оборудования, расходы на НИОКР и обучение персонала).

Для поддержки инноваций в малых и средних предприятиях (МСП) *TSB* планирует увеличить финансирование в рамках Инициативы по поддержке исследований в малых компаниях (*SBRI*) с 40 млн ф. ст. в 2012–2013 г. до 200 млн ф. ст. в 2014–2015 гг. [217].

Помимо этого для поддержки развития малых инновационных фирм в 2012 г. была запущена программа инновационных ваучеров, а в 2013 г. — программа «Патентная коробка»

(*Patent Box*), которая снижает эффективную ставку налога на прибыль, связанную с использованием патентов, зарегистрированных в Великобритании.

В 2011 г. была также создана Консалтинговая служба в производственной области (*Manufacturing Advisory Service*), целью работы которой является оказание консультативной поддержки малому и среднему бизнесу в области производственных технологий.

3.3. ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ ФРГ В СФЕРЕ НПТ

Контуры германской государственной политики по поддержке промышленности и НПТ

Германия — одна из немногих крупных индустриально развитых стран, которая за прошедшие полтора десятилетия смогла сохранить достаточно мощный промышленный потенциал, обеспечить устойчивый рост произведенной добавленной стоимости в промышленности и экспорта сложной промышленной продукции при положительном балансе торговли промышленной продукцией. Именно благодаря промышленному сектору Германия сравнительно легко перенесла мировой финансово-промышленный кризис.

Особенностью германской модели организации и функционирования промышленности выступает то, что кроме крупных транснациональных многоотраслевых холдингов (*Siemens AG, Thyssen* и т. д.) и ведущих отраслевых концернов мирового уровня (*Volkswagen, Mercedes-Benz AG, Audi AG, BMW AG, Hoechst AG, BASF AG, Robert Bosch GmbH, Mannesman AG, Industrie AG* и др.) в стране развит сегмент малого и среднего *промышленного* технологического бизнеса — так называемых *Mittelstand*. При этом *Mittelstand*, в отличие от аналогов в иных странах, не только играют роль подрядчиков и поставщиков крупных корпораций, но и самостоятельно предлагают сложные технологические решения в сфере специализированного машиностроения на отечественном и мировом рынках. По разным оценкам, промышленные малые и средние предприятия обеспечивают до половины и выше (по отдельным

направлениям до $\frac{2}{3}$) промышленного экспорта ФРГ. Кроме того, развита кооперация между основными типами высокотехнологичных компаний.

В силу этого на уровне федерального правительства отсутствуют по-настоящему масштабные национальные программы или группы скоординированных программ, направленных на всестороннее развитие НПТ. Однако исключением стала новая программа, инициированная в 2013 г., — «Индустрия 4.0» (*Industrie 4.0*), которая далее рассматривается более подробно. При этом с институциональной точки зрения ключевыми становятся институты Фраунгофера, давно и успешно работающие в Германии.

Основными органами, обеспечивающими финансирование и координацию государственных инновационных мероприятий в сфере НПТ, являются федеральные министерства экономики и энергетики (*BMWi*, ранее Министерство экономики и технологий), образования и науки (*BMBF*), а также Немецкое исследовательское общество (*DFG* — фонд, обеспечивающий конкурсное грантовое финансирование НИР).

Общество Фраунгофера

Общество Фраунгофера объединяет 67 институтов и исследовательских центров, ведущих ориентированные фундаментальные (небольшая часть) и прикладные исследования, а также спектр технологических работ в интересах крупного, среднего и малого бизнеса и правительственных структур. Годовой бюджет общества составляет приблизительно 2 млрд евро ($\frac{2}{3}$ из государственных источников, 90% которых — средства федерального правительства) и состоит из трех относительно равных частей:

- базового финансирования «задельных» работ фундаментального и прикладного характера (бюджетные средства и фонды ЕС);
- грантового и контрактного финансирования ориентированных прикладных исследований со стороны государства, промышленности, ЕС;
- контрактного финансирования, главным образом промышленностью, технологических работ.

Хотя государство специально не акцентирует развитие именно НПТ по линии общества (нет ни специальных программ, ни четко выраженной, «спущенной» от министерств или иначе оформленной системы приоритетов), но, несмотря на широкий спектр его работ¹, большая часть направлений его контрактных НИОКР (табл. 14) имеет прямое или косвенное отношение именно к производственным технологиям.

Таблица 14. Характеристика ключевых направлений контрактных НИОКР Общества Фраунгофера (2012 г.)

Направление контрактных НИОКР	Число институтов общества, участвующих в реализации работ по направлению	Затраты, млн евро		Рост финансирования по отношению к предшествующему году, %
		операционные	капитальные	
Материалы и компоненты	14	381	49	11
Микроэлектроника	12	230	26	6
ИКТ	15	212	14	5
Производственные технологии	7	190	18	8
Освещение и покрытия	6	114	19	7
Оборона и безопасность	7	193 (не специфицировано)		10
Науки о жизни	7	114	20	11

Источник: www.fraunhofer.de

Помимо этого общество выполняет еще несколько функций, касающихся развития НПТ. Прежде всего оно предостав-

¹ Основные группы НИОКР общества: здравоохранение и окружающая среда, ИКТ, энергетика, ресурсоэффективное производство, транспортные технологии (включая электромобили), а также оборона и безопасность.

ляет МСП и крупному бизнесу возмездные услуги в сфере передовых НИОКР и сопутствующей деятельности. Если говорить об МСП, то эти услуги стоят дешевле рыночных. Помощь общества оказывается критической для реализации сложных проектов, особенно требующих привлечения результатов прикладных и фундаментальных работ.

Далее это развитие прорывных технологий в интересах промышленности посредством участия групп институтов Фраунгофера в реализации так называемых важнейших (*Leitprojekte*) проектов. Такие проекты выполняются в кооперации с бизнесом и университетами. В настоящее время реализуется 4 важнейших проекта. Наиболее актуальным для развития НПТ является проект *E³ Production*, предполагающий создание энерго- и ресурсоэффективной фабрики с высокой долей автоматизации и нулевыми выбросами углекислого газа. Сроки реализации проекта — 2013–2016 гг. В 2014 г. по результатам НИОКР в партнерстве с *Volkswagen AG* обществом открыта опытная автомобильная фабрика в г. Хемниц для отработки и демонстрации НПТ — первая из нескольких подобных объектов. Общий объем расходов по проекту по линии общества в 2013–2014 гг. составил около 20 млн евро.

Другим инструментом реализации передовых и прорывных технологий и проектов с участием Общества Фраунгофера выступает программа формирования инновационных промышленных кластеров. На данный момент действует 20 кластеров с общим объемом финансирования в расчете на кластер до 20–30 млн евро. Это средства самого общества, промышленности и земель ФРГ. В кластерах кооперируются институты общества, университеты и бесприбыльные исследовательские центры, а также промышленные предприятия разного масштаба. Кластеры формируются вокруг конкретного проекта (от НИОКР до производства) при наличии финансовых и производственных обязательств партнеров. Выбор кластерообразующего проекта для поддержки становится и свидетельством наличия базы, и катализатором для дальнейшего кластерного развития территории. Характерно, что прямо или косвенно почти все кластеры связаны с производственными технологиями и процессами.

Отдельным значимым направлением работ общества является образовательная деятельность. До трети исследовательского персонала общества составляют аспиранты и молодые ученые, решение научно-образовательных задач считается необходимым условием поддержки кластеров, исследовательских центров, а также совместных с университетами проектов исследований и разработок.

Программа «Индустрия 4.0»

Несмотря на то что в целом НППТ не являются предметом масштабных национальных программ, одно направление, связанное с НППТ, находится как минимум с середины 2000-х годов в фокусе внимания федерального правительства. Это создание сложных киберфизических систем (КФС¹), новых поколений встроенных (*embedded systems*) датчиков, актуаторов, систем принятия решений, а также алгоритмов и программно-аппаратных средств автоматического интеллектуального управления распределенными производственными и инфраструктурными процессами и объектами. В ФРГ существует консенсус, что данные технологии в перспективе станут основой мирового лидерства германской промышленности. В числе мер, нацеленных на продвижение тематики КФС, можно выделить проекты по развитию семантических технологий Интернета, межмашинной коммуникации, новых технологий и стандартов для встроенных интеллектуальных систем, финансировавшихся BMWi и BMBF с середины 2000-х гг. В 2009 г. была разработана «Национальная дорожная карта по встраиваемым системам» [218]. В период кризиса германское правительство существенно активизировало поиски новых точек роста, конкурентоспособности, и технологии, относящиеся к НППТ, оказались в центре внимания. Тематика КФС получила приоритетное внимание в проекте «Индустрия 4.0» (*Industrie 4.0*). «Индустрия 4.0» была

¹ Системы, объединяющие физическое и виртуальное (модели, управление и т. д.) измерение производственных, бизнес- и организационных процессов и основанные на передовых IT-решениях.

инициирована в 2012 г. как один из десяти «проектов будущего» [219] в рамках плана действий по осуществлению германской федеральной «Стратегии в области высоких технологий-2020», концепции инновационного развития и укрепления позиций ФРГ на мировых рынках (первая версия представлена в 2006 г. [220], в 2010 и 2014 гг. выпущены новые редакции [221]).

В центре внимания «Индустрии 4.0» — создание «умного предприятия» (*Smart Factory*), а также решение сопутствующих задач как основы 4-й промышленной революции в рамках формирования КФС. На эти цели в течение 10–15 лет планируется затратить до 200 млн евро [222].

Особенностью «Индустрии 4.0» как проекта будущего является его организация. Это зонтичная виртуальная программа, идеологически объединяющая значительное число различных министерских мероприятий и партнерств с бизнесом и реализующаяся на основе государственно-частного партнерства (ГЧП) на всех стадиях планирования, реализации и контроля мероприятий.

«Индустрия 4.0» состоит из целого ряда программ и проектов. К их числу относится, например, программа «Наука и техника самоуправляющихся систем для промышленности 4.0 — производство, продукты, услуги в многомерном Интернете будущего» (*AUTONOMIK für INDUSTRIE 4.0*, финансирование на первом этапе — по 40 млн евро от *BMW* и промышленности [223–225]) — наследница прежней программы *AUTONOMIK*. Цель программы — разработка интеллектуального взаимодействия ИКТ и промышленного производства. Следует упомянуть и такие мероприятия ГЧП, как *RES-COM* (2011–2015 гг., 9 млн евро) по разработке интегрированных систем датчиков и актуаторов в целях ресурсосбережения в промышленных процессах; *CyPros* — создание киберфизических производственных систем (2012–2015 гг.) и т. д.

Отдельным проектом «Индустрии 4.0» является один из ведущих кластеров ФРГ — так называемый *it's OWL*, Интеллектуальные технические системы региона Восточная Вестфалия — Липпе¹. В кластер входят 174 организации, включая 126 круп-

¹ Один из регионов земли Северный Рейн — Вестфалия.

ных, средних и малых компаний в сфере машиностроения, электротехники, автомобилестроения и 17 университетов. В рамках 46 проектов разрабатываются новые технологии самооптимизации систем, взаимодействия человека и машин, интеллектуальных сетей и системной инженерии. Финансирование (до 2017 г.) кластера обеспечивают *BMBF* — около 40 млн евро, и промышленные партнеры — около 70 млн евро.

Государственное финансирование проектов «Индустрии 4.0» осуществляется *BMBF* и *BMWi* при участии федерального Министерства внутренних дел (BMI) и экспертной поддержке Научно-промышленного альянса в сфере исследований. Кроме того, мероприятия «Индустрии 4.0» имеют право претендовать на фонды ЕС и финансирование по линии национальной программы «Цифровая Германия-2015» (координатор — *BMWi*) в части разработки *IT*-технологий, стандартов и т. п.

Ключевую роль в планировании и поддержке реализации «Индустрии 4.0» играет Совместная платформа промышленности 4.0 — управляющий и координирующий орган проекта в форме государственно-частного партнерства. Он обеспечивает взаимодействие участников работ. Платформа создана крупнейшими отраслевыми ассоциациями ФРГ — Федеральным объединением информационных, телекоммуникационных и компьютерных технологий (*BITKOM*), Объединением немецких машиностроительных предприятий (*VDMA*) и Центральным объединением электротехники и электроиндустрии (*ZVEI*). По экспертным оценкам, учитывая акцент «Индустрии 4.0» на проблематике КФС и в целом на *IT*-тематике, наибольшую активность проявляет *BITKOM*.

Анализ германской политики по развитию НПТ

В целом германская политика в сфере развития НПТ характеризуется высокой преемственностью в части как тематики, так и инструментов. Ее можно рассматривать как логическое продолжение более ранних усилий по созданию новых технологических платформ и прорывных технологий.

По сути, федеральное правительство делегирует роль национального координатора бизнес-сектору и даже крупным

компаниям и их бизнес-ассоциациям. Последние выполняют функцию своего рода коллективного системного квалифицированного заказчика на НПТ. В этом качестве и крупный бизнес, и его объединения должны (в идеальном сценарии) обеспечить системную сборку технологических платформ будущего и их тиражирование при разделении с госсектором рисков и затрат.

На сегодняшний день очевидны позитивные результаты такого подхода (лидерство Германии в Европе), однако ряд аспектов данного подхода еще не оптимальны. Первое — это недостаточная координация различных направлений федеральной политики. До сих пор наблюдается своего рода «ло-скутная» поддержка разных видов НПТ по линии *BMBF*, *BMWi*, *DFG* и Общества Фраунгофера, отсутствие единой идеологии развития (что, например, есть в США), «больших» программ в сфере передового материаловедения, промышленной робототехники. Здесь явно не хватает аналогов Совместной платформы «Индустрии 4.0».

Второе — это проблемы опоры на крупный бизнес в ГЧП. Это не всегда оправданно с учетом специфики НПТ, которые тяготеют скорее к распределенным и малым формам (в части разработки как технологий, так и новых бизнес- и производственных моделей — «малосерийных» производств, ИТ-услуг и т. п.).

Анализ «Индустрии 4.0» и ряда иных текущих мероприятий оставляет также без ответа вопрос о роли малых компаний и *Mittelstand* в процессах индустриальной революции. С одной стороны, в государственных документах подчеркивается значение малого и среднего бизнеса, с другой — даже структура платформы, а также состав участников крупнейших инфраструктурных проектов свидетельствуют о доминировании крупного бизнеса. Недостаточность поддержки МСП подтверждается германскими аналитиками, что является одной из основных их претензий к проводимой государственной политике [226].

Действительно, неочевидно, что устоявшиеся, «старые» корпорации способны возглавить новую индустриальную революцию. Несмотря на то что они декларируют ее необходимость, пока их модели и структуры активов далеко не во

всем соответствуют требованиям развития НПТ. Такая перестройка сложна и может затянуть процесс реиндустриализации.

3.4. Выводы для России из зарубежного опыта государственной инновационной политики по поддержке НПТ

Несмотря на имеющийся достаточно обширный опыт по применению мер государственной инновационной политики по поддержке НПТ в США, Великобритании и Германии, необходимо отметить сложность прямого переноса инструментов в российскую практику, что обусловлено качественно различающимися базовыми условиями (уровень развития науки, обрабатывающей промышленности, кооперационных связей в национальных инновационных системах и т. д.).

В то же время полезными для формирования государственной инновационной политики в России представляются общие принципы, лежащие в основе выбора и реализации НПТ.

Среди них можно выделить принцип формирования промежуточного звена, своего рода моста между университетами и бизнесом для развития НПТ. Так, если для предыдущих технологических приоритетов, таких как ИКТ и биотехнологии, именно университеты (или бизнес-инкубаторы, технопарки при университетах) являлись основными «поставщиками» новых компаний с инновационной продукцией на рынки, то для НПТ, ориентированных в первую очередь на машиностроение, из-за большей капиталоемкости исследований становятся необходимыми дополнительные элементы для поддержки развития. В Германии такими элементами традиционно были институты Фраунгофера, в США — институты, созданные в рамках Национальной сети по развитию производственных инноваций, в Великобритании — сеть исследовательских центров внутри катаapultы в области обрабатывающей промышленности с высокой добавленной стоимостью.

Вторым важным принципом становится усиление координации между государством и бизнесом, в первую очередь крупным, при определении масштабов государственных ас-

сигнований на исследования. Механизмы координации по большей части предусматривают создание различных отраслевых консорциумов, чьи проекты софинансируются со стороны государства.

Наконец, зарубежный опыт свидетельствует о растущей роли производственных цепочек в национальных экономиках и потому важности поддержки их формирования и развития через содействие малым и средним предприятиям. Поскольку развитие НПТ потенциально влияет на перераспределение добавленной стоимости в пользу инновационных МСП, целенаправленная поддержка МСП государством может рассматриваться как развитие институциональной базы для новых производственных технологий.

3.5. РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ, РЕЛЕВАНТНЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В России на протяжении всего постсоветского периода вводились как прямые, так и косвенные меры стимулирования технологического развития, которые могут оказывать в том числе положительное влияние на развитие новых производственных технологий. Одной из первых адресных мер, основанных на государственно-частном партнерстве, были «важнейшие инновационные проекты государственного значения» [227] — крупные проекты, выполнявшиеся коллективами, объединяющими представителей науки и промышленности. Проекты должны были решать ключевые проблемы конкурентоспособности, в том числе снижения издержек производства за счет ресурсосбережения. Итоги реализации мегапроектов, по данным, доступным на сегодняшний день, неоднозначны. Один из недостатков — то, что финансирование НИОКР осуществлялось только из средств бюджета, а проведением НИОКР занимались научные организации и вузы и контракт заключался именно с ними, — был исправлен позднее, когда появился инструмент «связанных грантов».

В новой схеме «связанных грантов» требовалось проводить бюджетные средства на НИОКР через компании для перечисле-

ния их НИИ и вузам. Стали поддерживаться научно-производственные партнерства. При этом объем собственных средств предприятия, вкладываемых в проект, должен был составлять не менее 100% размера субсидии.

Одним из эффектов данного инструмента стало расширение интереса компаний к взаимодействию с вузами и формирование на этой основе исследовательских сетей. Были также отмечены следующие позитивные результаты [228]:

- усиление ориентации вузов на решение практических задач, в которых заинтересован бизнес, и усиление общей мотивации (особенно молодых) ученых вести научные исследования;
- вовлечение студентов и аспирантов в исследовательский процесс, уточнение востребованных и недостающих компетенций;
- институционализация взаимоотношений между вузами и бизнесом в инновационной сфере; расширение кооперации в области исследований, формирование консорциумов;
- активизация селекции лучших специалистов и подразделений в университетах, приобретение (или восстановление) необходимых навыков и компетенций (прежде всего в части решения инженерных задач), модернизация образовательных программ в соответствии с потребностями бизнеса.

Наибольшие эффекты были отмечены для средних компаний, которые могут гибко реагировать на изменения и имеют при этом необходимые для этого ресурсы.

Программы инновационного развития (ПИР) крупных компаний с государственным участием стали еще одной мерой для научно-технологического развития крупного бизнеса. ПИР представляет собой среднесрочный (3–5 лет, с перспективой до 5–9 лет) корпоративный программный документ, который утверждается органами управления компании. Цели ПИР были сформулированы в основном в количественных терминах роста расходов на НИОКР и других затрат на инно-

зации. Практика показала, что компаниям несложно продемонстрировать рост количественных показателей, однако это необязательно приводит к прорыву в развитии. Пока экономический эффект от ПИР, в том числе выраженный в росте производительности труда и создании новых продуктов, несопоставим с расходами.

С точки зрения инфраструктурных мер релевантным инструментом для поддержки развития новых производственных технологий можно считать технопарки. В настоящее время в России идут серьезные дебаты относительно низкой эффективности функционирования и направлений дальнейшего развития технопарков. Проблемными являются как эффективность расходования бюджетных ресурсов в рамках различных программ, так и базовые принципы работы технопарков. Важным направлением их развития для целей стимулирования НПТ является наращивание уровня технологической обеспеченности. Пока такие меры применяются в пилотном режиме. Так, Минэкономразвития инициировало в 2010 г. пилотный проект по созданию центров прототипирования на базе новосибирского технопарка «Академпарк». Создание центра прототипирования было направлено на содействие резидентам технопарков в быстром и недорогом изготовлении прототипов инновационной продукции и ее мелкосерийном производстве.

Бизнес-модель Центра технологического обеспечения (так называется центр прототипирования в Академгородке) основана на схеме, в рамках которой государство по согласованию с резидентами технопарка закупает необходимое оборудование, а затем сдает его в аренду по льготным ставкам. На базе закупленного оборудования формируются небольшие компании, предоставляющие услуги по мелкосерийному производству («инфраструктурные» компании), в первое время в основном для более крупных компаний технопарка, затем существенно расширяя базу контрагентов и таким образом обеспечивая большую загрузку оборудования.

Во-первых, так обеспечивается заинтересованность компаний, использующих оборудование, в его высоком качестве и по возможности низкой стоимости (так как этим компаниям потом предстоит платить за него арендную плату). Во-вторых,

за счет постепенного расширения рынка сбыта для «инфраструктурных» компаний обеспечивается снижение стоимости владения оборудованием по сравнению со случаем, когда оборудование находится в собственности более крупных инновационных компаний технопарка и работает только на них.

В результате формирования в технопарке подобной «инфраструктурной» прослойки технологических компаний появляется возможность быстро и относительно недорого сделать опытный образец или мелкую серию под конкретный заказ других МСП. Помимо этого за счет наличия сети «инфраструктурных» компаний, с которыми работают сразу несколько инновационных фирм технопарка, усиливается их взаимодействие между собой и выстраиваются кооперационные взаимосвязи, что формирует инновационную среду.

Повышение уровня технологической оснащенности технопарков актуально также в связи с появлением отдельных попыток перестроить производственные цепочки в рамках крупных госпредприятий с выносом отдельных технологических функций на аутсорсинг малым и средним инновационным компаниям.

4. Библиометрический и патентный анализ развития новых производственных технологий

Анализ публикационной активности был осуществлен на основании данных международной наукометрической базы *Web of Science (WoS)*, аккумулирующей публикации более чем 12 тыс. наиболее авторитетных научных журналов. Выбранный временной интервал — с 01.01.2000 г. по сентябрь 2014 г.

Патентный анализ осуществлен на основании базы данных компании *Questel — Orbit* — крупнейшего в мире патентного фонда, содержащего свыше 60 млн документов 95 стран и международных патентных ведомств. Выбранный временной интервал — с 01.01.1994 г. по август/сентябрь 2014 г.

4.1. Информационные технологии для управления производственным циклом

Данные анализа актуального уровня и трендов исследовательской активности в области информационных технологий для управления производственным циклом в мире свидетельствуют

о высоком интересе к прикладным аспектам этого направления. За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в *WoS* было проиндексировано 16 890 публикаций, посвященных информационным технологиям в производственном цикле. В 2000–2006 гг. количество публикаций по данной теме в мире неуклонно росло. С 2008 г. по настоящее время ежегодное количество статей по данной теме, проиндексированных в *WoS*, колеблется на уровне 1500 в год (рис. 24).

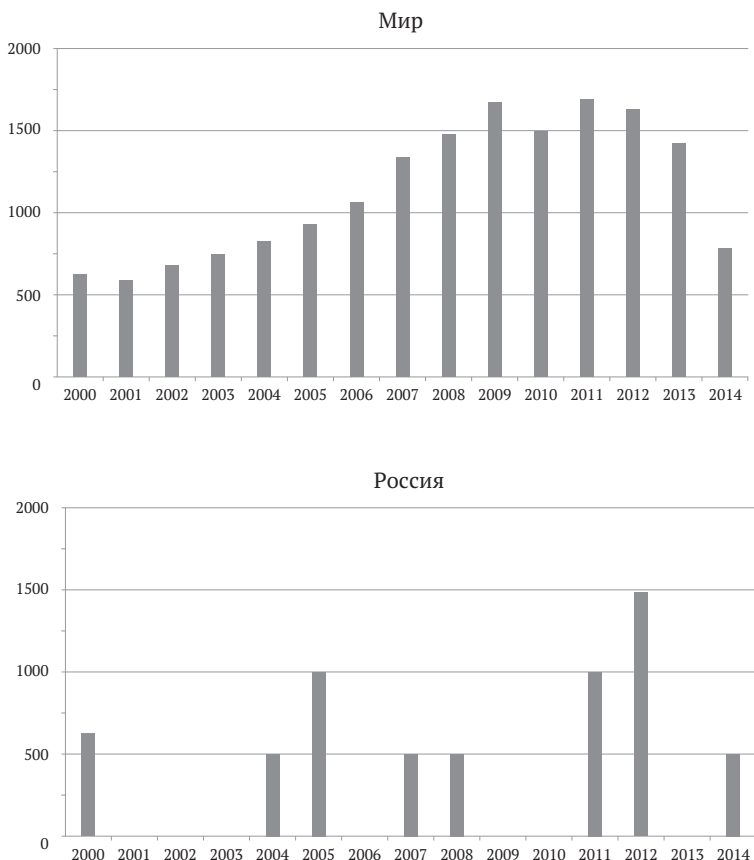


Рис. 24. Динамика общего количества публикаций в мире и в России в области информационных технологий для управления производственным циклом, 2000–2014 гг. (данные *WoS* на 24.09.2014 г.)

Лидерами по удельному весу в общемировом публикационном потоке, проиндексированном в *WoS*, считаются Евросоюз (38%) и США (28%). Третье место занимает Китай с 13% публикаций.

Доля России в общемировом массиве публикаций, проиндексированных в *WoS* за 2000–2014 гг., незначительна и составляет всего 0,07%. В абсолютном выражении это лишь 12 статей, имеющих аффилиацию с РФ, из которых 33% являются мультинациональными, т. е. написанными по результатам международных коллабораций. В общемировом рейтинге публикационной активности по данному направлению Россия занимает 56-е место, примерно столько же статей имеют аффилиацию с исследовательскими центрами Словакии, Ливана, Филиппин и Уругвая.

За последние 20 лет (1994–2014 гг.) в мире выдано 5365 патентов, связанных с информационными технологиями для управления производственным циклом. Динамика патентования за рассматриваемый период демонстрирует стабильный линейный рост патентной активности в мире по данной теме за 1994–2006 гг. (рис. 25). Начиная с 2007 г. рост патент-

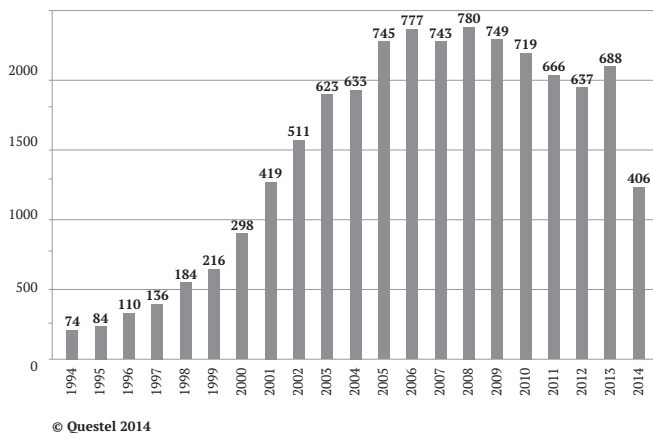


Рис. 25. Динамика общемирового количества патентов в области информационных технологий для управления производственным циклом (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

ной активности прекратился, однако ежегодный уровень остается стабильно высоким и составляет около 700 патентов.

В число главных патентообладателей не вошел ни один исследовательский центр мира. Десять верхних позиций рейтинга занимают промышленные компании США, Японии, Южной Кореи и Тайваня (табл. 15).

Таблица 15. Мировые лидеры по числу патентов в области информационных технологий для управления производственным циклом, 2000–2014 гг. (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

Организация	Количество патентов
<i>Canon</i>	240
<i>IBM</i>	215
<i>Hewlett Packard</i>	97
<i>Samsung Electronics</i>	95
<i>Sony</i>	74
<i>Panasonic</i>	73
<i>Toshiba</i>	69
<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing</i>	60
<i>Au Optronics</i>	59
<i>Hitachi</i>	56

Анализ патентной активности российских изобретателей свидетельствует о скромной позиции России среди стран, развивающих информационные технологии для управления производственным циклом. За исследуемый период в России было выдано 155 патентов, причем всего 31 из них — российским заявителям и 124 (80,00%) — зарубежным заявителям. Доля патентов с российским приоритетом составляет всего лишь 0,58% общемирового массива патентов. За пределы РФ вышли только 5 патентов резидентов, которые не относятся к триадным патентным семьям¹.

¹ Патент на изобретение, зарегистрированный Европейским патентным бюро (EPO), Бюро патентов и торговых марок США (USPTO) и Японским патентным бюро (JPO).

4.2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в WoS проиндексировано 4175 публикаций, содержание которых релевантно направлению «компьютерные технологии для моделирования и производства изделий». Стабильный рост ежегодно индексируемого числа публикаций наблюдается с 2000 г. и сохраняется до настоящего времени. За этот период общемировой объем публикаций в WoS увеличился почти в 2 раза (рис. 26).

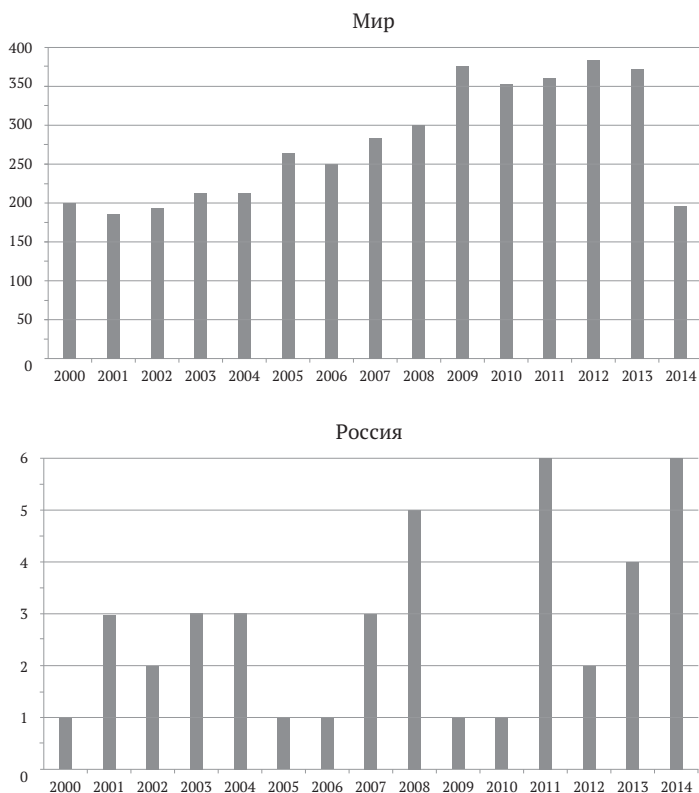


Рис. 26. Динамика общего количества публикаций по компьютерным технологиям для моделирования и производства изделий в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные WoS на 04.09.2014 г.)

Лидерами по удельному весу в общемировом публикационном потоке являются Евросоюз и США, на совокупную долю которых приходится почти две трети статей (60%). Рейтинг публикационной активности возглавляют страны ЕС-27 (37,3%), США (23,7%), далее следует Китай (15,1%) и с двукратным отрывом от него Великобритания (7,4%).

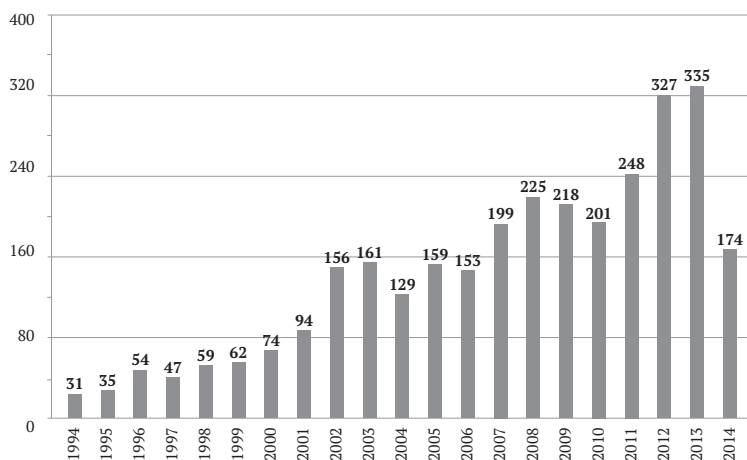
Доля России в общемировом объеме публикаций, посвященных различным аспектам использования компьютерных технологий для моделирования и производства изделий и проиндексированных в *WoS* за 2000–2014 гг., составляет 1,02%. Каждая третья (38%) из 42 статей, имеющих аффилиацию с РФ, написана международным авторским коллективом. В общемировом рейтинге по публикационной активности по данному направлению Россия занимает 23-е место, примерно столько же статей имеют аффилиацию с исследовательскими центрами Нидерландов, Греции, Португалии и Румынии.

За 1994–2014 гг. наблюдается устойчивая положительная динамика числа технологических решений, связанных с использованием компьютерных технологий для моделирования и производства изделий, что подтверждает возможности их широкого индустриального применения (рис. 27).

За последние 20 лет в мире выдано 2092 патента, связанных с компьютерными технологиями для моделирования и производства изделий. Приоритет имеют США (966), второе место по количеству патентов занимает Китай (560), далее с существенным отрывом идут Япония (136) и Южная Корея (121).

Десять верхних позиций рейтинга патентообладателей занимают промышленные компании США, Франции, Японии и Германии. В число топ-30 патентообладателей вошли также восемь университетов мира.

Анализ патентной активности российских изобретателей свидетельствует о более чем скромной позиции России среди стран, развивающих технологии в данной технической области. За 20-летний период в России было выдано 32 патента, причем 17 из них — российским заявителям и 15 — зарубежным заявителям. Доля патентов с российским приоритетом составляет лишь 0,81% общемирового массива патентов. С этим показателем Россия занимает 10-е место в мире, однако разрыв со стра-



© Questel 2014

Рис. 27. Динамика общемирового количества патентов по компьютерным технологиям для моделирования и производства изделий, 1994–2014 гг. (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

нами-лидерами (США, Китай, Южная Корея, Япония), на долю которых суммарно приходится более 90% всех выданных в мире патентов, весьма существен. За пределы РФ вышел только один патент резидентов.

4.3. ПРОМЫШЛЕННАЯ И СЕРВИСНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Экспоненциальный рост публикационной активности по направлению «промышленная и сервисная робототехника», зафиксированный в WoS, наблюдался с начала нулевых до 2008 г., после чего ежегодный объем публикаций стабилизировался на уровне около 5 тыс. публикаций в год. Всего же за последние 14 лет в WoS проиндексирована 55 841 публикация (рис. 28).

Более половины статей мирового публикационного потока написаны авторами из стран Евросоюза и США. Публикационный рейтинг отдельных стран возглавляют США (21%), Китай (12%), Япония (12%), Германия (7%), Великобритания (5%), Южная Корея (5%).

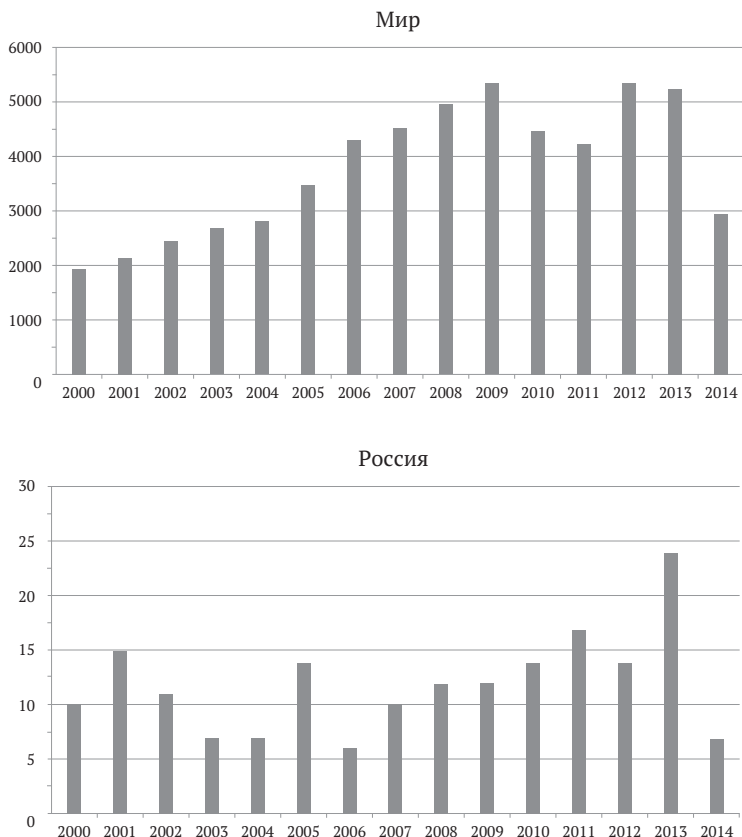
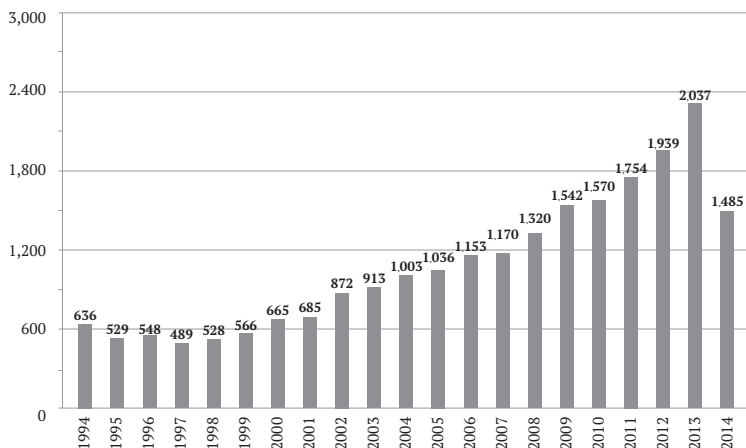


Рис. 28. Динамика общего количества публикаций по направлению «промышленная и сервисная робототехника» в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные WoS на 12.09.2014 г.)

Доля России в общемировом объеме публикаций, проиндексированных в WoS за 2000–2014 гг., составляет всего 0,32%. Из 180 статей, имеющих аффилиацию с РФ, 45 (25%) созданы международными авторскими коллективами. В общемировом рейтинге по публикационной активности по данному направлению Россия занимает 34-е место. По количеству публикаций в международном сегменте Россия уступает лидеру — США в 66 раз, Китаю — в 38 раз, Японии — в 36 раз.

Всего за последние 20 лет (1994–2014 гг.) по направлению «промышленная и сервисная робототехника» в мире выдано 17 053 патента. Наибольшее количество патентов в данной области принадлежит резидентам Китая, Японии и США (рис. 29).



© Questel 2014

Рис. 29. Динамика общемирового количества патентов по направлению «промышленная и сервисная робототехника» (данные Orbit на 12.09.2014 г.)

Девять верхних позиций рейтинга патентообладателей занимают крупные промышленные компании Японии, Швеции, Швейцарии, Индии, Германии и Южной Кореи (табл. 16).

Таблица 16. Мировые лидеры-патентообладатели по направлению «промышленная и сервисная робототехника», 1994–2014 гг. (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

Патентообладатель	Количество патентов
1	2
1. <i>Yaskawa Electric</i>	289
2. <i>Fanuc</i>	263
3. <i>ABB</i>	249

1	2
4. <i>Mitsubishi Electric</i>	227
5. <i>Panasonic</i>	201
6. <i>Kuka Roboter</i>	191
7. <i>Sony</i>	190
8. <i>Honda Motor</i>	182
9. <i>Samsung Electronics</i>	172
10. <i>NAL — National Aerospace Laboratories</i>	147

За 1994–2014 гг. в России выданы 673 патента, защищающих технологические решения в области промышленной и сервисной робототехники, из которых 483 патента — российским заявителям, а 190 (28,23%) — зарубежным.

Доля патентов с российским приоритетом составляет 2,83% общемирового массива патентов (7-е место в мире). Отставание по количеству патентов национальных заявителей от стран-лидеров (Китая и Японии) составляет 5–10 раз.

За пределы РФ вышли 15 патентов резидентов, и только один из них относится к триадным.

4.4. АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО (ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ)

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в WoS было проиндексировано 4615 публикаций, посвященных технологиям аддитивного производства. Динамика публикационной активности свидетельствует о стабильном нарастании интенсивности исследований, только за последние три года (2010–2013 гг.) количество ежегодно публикуемых статей по технологиям аддитивного производства удвоилось по сравнению с предшествующими тремя годами (рис. 30).

Более половины (60%) публикаций по технологиям аддитивного производства относятся к наукам о материалах и инженерным наукам. Следует отметить взрывной рост интереса к данным технологиям и в области компьютерных наук: так,

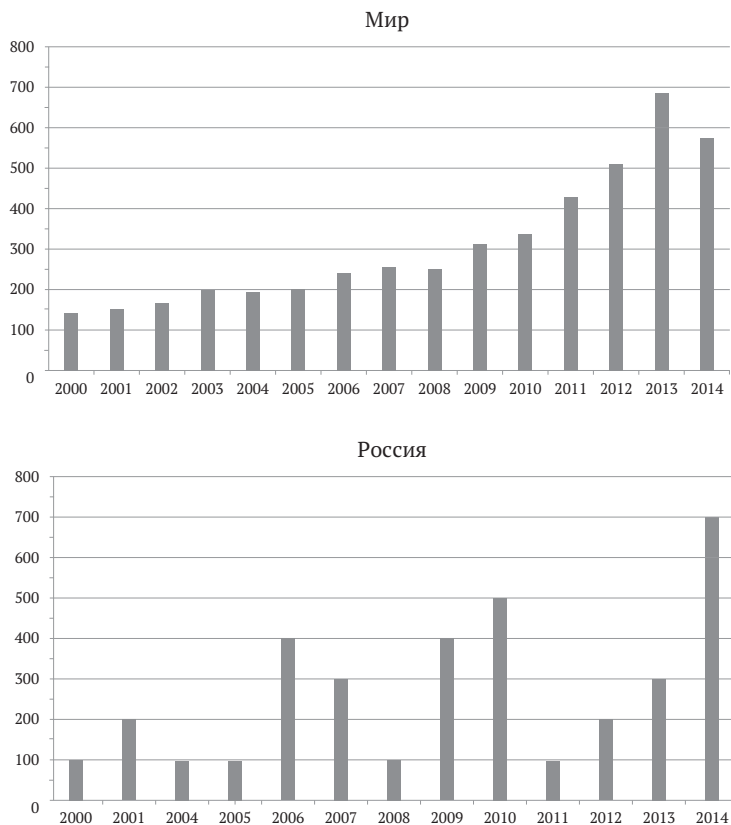


Рис. 30. Динамика общего количества публикаций в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные WoS на 08.09.2014 г.)

в 2013 г. количество научных публикаций в ведущих международных журналах по технологиям аддитивного производства, отнесенным к компьютерным наукам, увеличилось по сравнению с предыдущим годом более чем в два раза.

Лидерами по удельному весу в общемировом публикационном потоке являются Евросоюз и США, на долю каждого из которых приходится более трети статей. Публикационный рейтинг отдельных стран возглавляют США (32%), Китай (9,6%), Великобритания (9,5%), Германия (9%), Южная Корея (6,3%) и Япония (5,4%).

Доля России в общемировом объеме публикаций, посвященных вопросам разработки и использования аддитивных производств, проиндексированных в WOS за 2000–2014 гг., является незначительной и составляет всего 0,76%. Из 35 статей, имеющих аффилиацию с РФ, 26% написаны по результатам, полученным в рамках международных проектов. В общемировом рейтинге публикационной активности по данному направлению Россия занимает 26-е место, примерно столько же статей имеют аффилиацию с исследовательскими центрами Греции, Израиля, Финляндии, Польши.

За последние 20 лет (1994–2014 гг.) в мире был выдан 9951 патент, связанный с технологиями аддитивного производства. Динамика патентования за рассматриваемый период была стабильно положительной, за исключением кратковременной стагнации в 2009–2011 гг. (рис. 31). Начиная с 2012 г. рост патентной активности возобновился, и по состоянию на сентябрь текущего 2014 г. число выданных патентов уже превосходит показатели 2013 г.

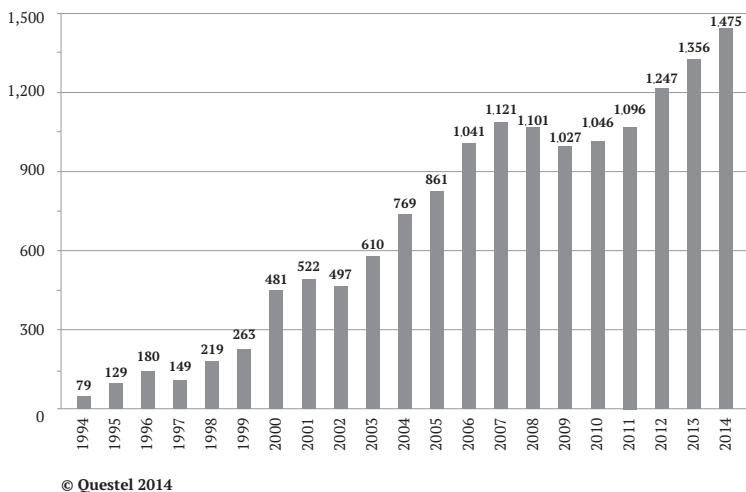


Рис. 31. Динамика общемирового количества патентов, связанных с технологиями аддитивного производства (данные Orbit на 16.09.2014 г.)

Все верхние позиции рейтинга патентообладателей занимают промышленные компании Южной Кореи, США и Японии (табл. 17).

Таблица 17. Организации-лидеры по числу патентов по технологиям аддитивного производства (данные *Orbit* на 20.09.2014 г.)

Патентообладатель	Количество патентов
1. <i>Samsung Electronics</i>	780
2. <i>Hynix Semiconductor</i>	374
3. <i>Samsung Electro Mechanics</i>	253
4. <i>LG Display</i>	238
5. <i>Samsung Display Devices</i>	214
6. <i>LG Philips LCD</i>	213
7. <i>Samsung SDI</i>	211
8. <i>LG Electronics</i>	180
9. <i>LG Innotek</i>	157
10. <i>Dongbu Hitek</i>	110

За исследуемый период в России выдан 131 патент, защищающий технологические решения в области аддитивного производства, из которых 14 — российским заявителям и 117 (89,31%) — зарубежным заявителям.

Доля патентов с российским приоритетом составляет 0,14% общемирового массива. С этим показателем Россия занимает 14-е место в мире, однако разрыв со странами-лидерами (Южная Корея, Япония, США и Китай), на долю которых приходится более 90% всех выданных в мире патентов, весьма существен.

4.5. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ УСКОРЕННОЙ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в *WoS* было проиндексировано 5368 публикаций, посвященных компьютерному дизайну с использованием теоретических моделей и баз данных

для направленной ускоренной разработки новых материалов с заданными свойствами. За последние 14 лет наблюдается стабильный рост публикационной активности в этой области (рис. 32).

Лидерами по доле публикаций в общемировом потоке, проиндексированных в *WoS*, являются Евросоюз (41% общего количества мировых публикаций) и США (35%). У Китая — 8,6% публикаций, у Японии — 5,1%.

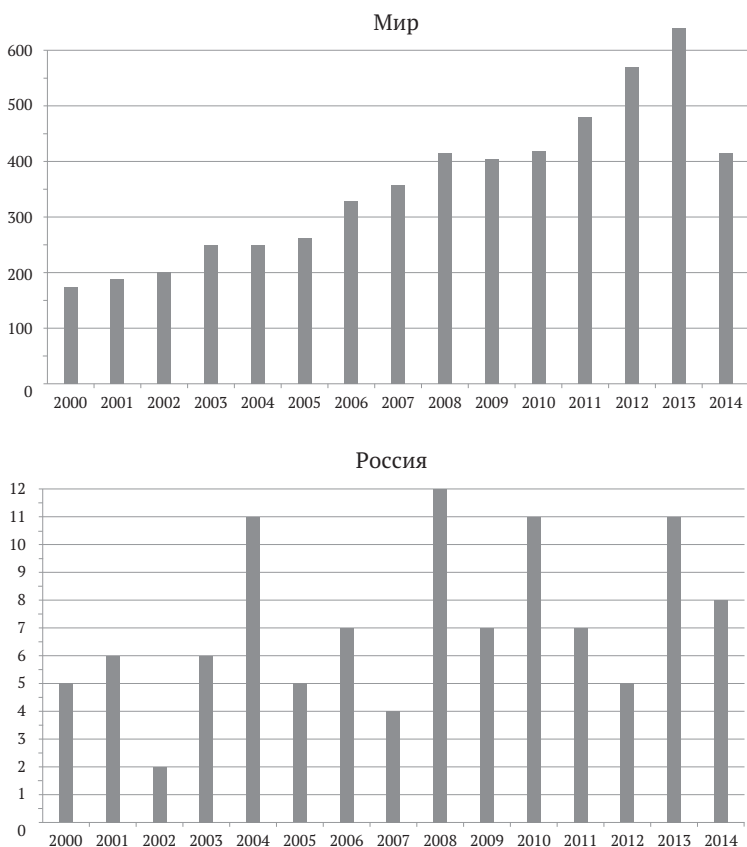
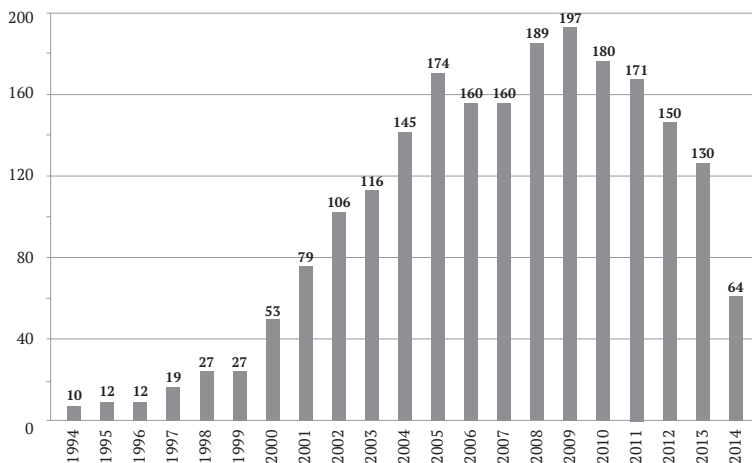


Рис. 32. Динамика публикаций по компьютерному дизайну для направленной ускоренной разработки новых материалов с заданными свойствами в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные *WoS* на 16.09.2014 г.)

Доля России в общемировом объеме публикаций, посвященных аспектам использования средств компьютерного дизайна для разработки новых материалов, проиндексированных в *WoS* за 2000–2014 гг., составляет 1,99%. Из 107 статей, имеющих аффилиацию с РФ, 44% являются мультинациональными. В общемировом рейтинге по публикационной активности по данному направлению Россия занимает 16-е место с отставанием от лидера (США) в 17 раз и имея близкие показатели с Турцией, Австрией, Тайванем и Польшей.

Линейный рост числа патентов, связанных с использованием компьютерного дизайна для разработки новых материалов с заданными свойствами, наблюдался с начала нулевых до 2005 г., после чего до 2011 г. наблюдалась некоторая стагнация патентной активности, сменившаяся спадом в 2012–2014 гг. (рис. 33).

За последние 20 лет (1994–2014 гг.) в мире было выдано 995 патентов, связанных с разработкой новых материалов с за-



© Questel 2014

Рис. 33. Динамика общемирового количества патентов, защищающих решения по компьютерному дизайну для разработки новых материалов с заданными свойствами (данные *Orbit* на 16.09.2014 г.)

данными свойствами и использованием компьютерного дизайна. В число 10 лидеров по количеству патентов вошли патентообладатели из Китая, США, Японии и Южной Кореи, при этом наибольшее количество патентных документов (51) принадлежит Юго-Восточному университету Китая (табл. 18).

Таблица 18. Топ-10 обладателей патентов по компьютерному дизайну с использованием теоретических моделей для разработки новых материалов (данные *Orbit* на 20.09.2014 г.)

Патентообладатель	Количество патентов
<i>Southeast University (Nanjing China)</i>	51
<i>Qualcomm</i>	32
<i>Canon</i>	22
<i>Hitachi</i>	21
<i>Sony</i>	16
<i>Samsung Electronics</i>	14
<i>Panasonic</i>	14
<i>Fujitsu</i>	13
<i>Seiko Epson</i>	13
<i>Toshiba</i>	13

За исследуемый период в России было выдано 50 патентов, защищающих решения использования компьютерного дизайна для разработки новых материалов с заданными свойствами, причем только 3 из них выданы резидентам РФ, остальные 47 (94,00%) — зарубежным заявителям.

Доля патентов с российским приоритетом составляет всего 0,3% общемирового массива выданных патентов. По этому показателю Россия занимает 11-е место в мире, однако разрыв со странами-лидерами (Южная Корея, Япония, США и Китай), на долю которых суммарно приходится более 90% всех выданных в мире патентов, весьма существен. За пределы РФ вышел только 1 патент резидента.

4.6. КОМПОЗИТЫ, «ИЕРАРХИЧЕСКИЕ» МАТЕРИАЛЫ, СКОНСТРУИРОВАННЫЕ ПО ПОДОБИЮ ПРИРОДНЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в WoS проиндексировано 26 483 публикации, посвященные композиционным, «иерархическим» материалам. С 2005 г. наблюдается линейный рост публикационной активности по данному направлению (рис. 34).

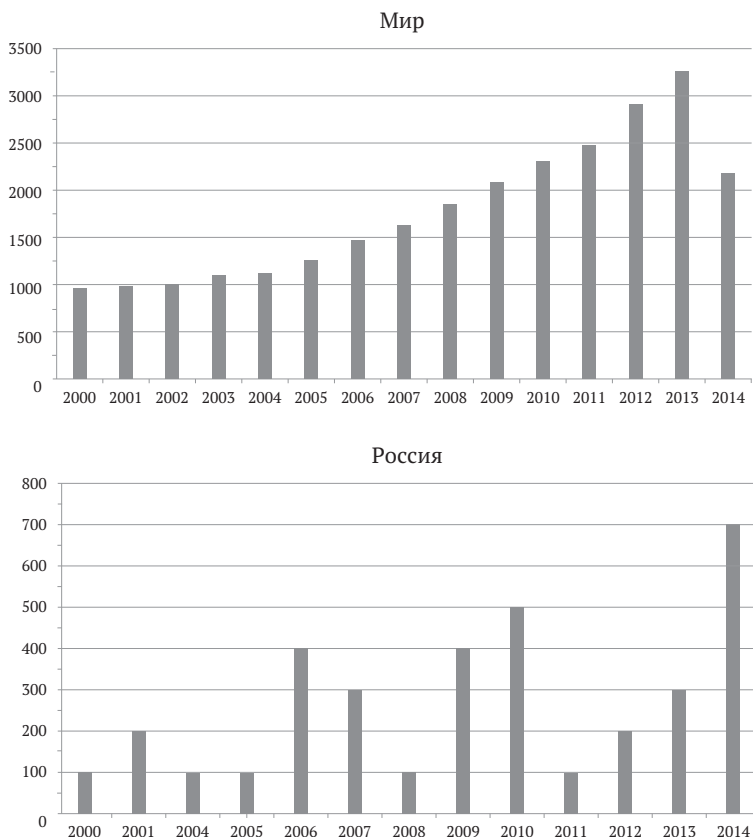


Рис. 34. Динамика общего количества публикаций по направлению «композиты, «иерархические» материалы» в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные WoS на 27.08.2014 г.)

Лидерами по удельному весу в общемировом публикационном потоке, проиндексированном в WoS, являются Евросоюз и США. На их долю суммарно приходится более 60% проиндексированных в WoS статей. Первую позицию публикационного рейтинга отдельных стран занимают США (26%) и Китай (17%). Наряду с ними в число лидеров по количеству публикаций вошли Великобритания (7%), Германия (6%) и Франция (5%).

За 2000–2014 гг. в WoS была проиндексирована 371 публикация, имеющая аффилиацию с РФ, что составляет 1,4% общемирового объема публикаций, треть из которых (31%) написаны по результатам международных коллабораций. В общемировом рейтинге публикационной активности по данному направлению Россия занимает 19-е место, примерно столько же статей имеют аффилиацию с исследовательскими центрами Польши, Португалии, Швейцарии, Сингапура.

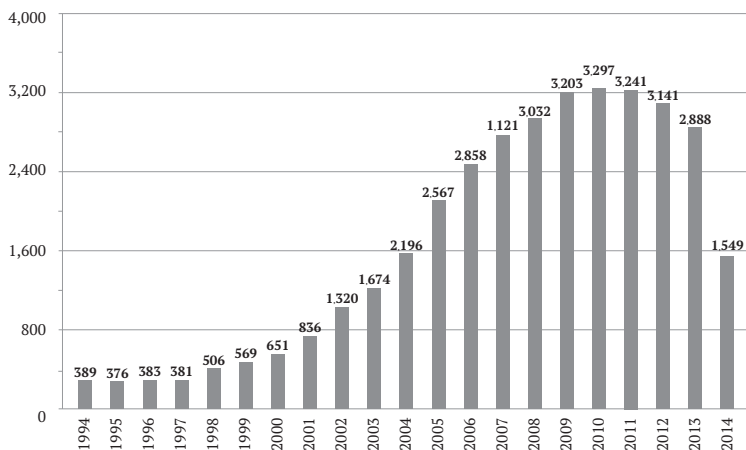
За последние 20 лет (1994–2014 гг.) в мире выдан 16 871 патент, связанный с технологиями производства и применения композиционных, «иерархических» материалов. Анализ динамики патентной активности в области «композиты, «иерархические» материалы» обнаружил практически экспоненциальный ее рост в период с 2000 по 2007 г., после чего рост замедлился, а начиная с 2010 г. наметилась тенденция к некоторому сокращению числа ежегодно выдаваемых в мире патентов в данной технической области, хотя патентная активность остается достаточно высокой (рис. 35).

Лидерами патентования в данной технической области являются США (4809 патентов), Япония (2959 патентов) и Китай (2227 патентов).

Среди ведущих патентообладателей преобладают крупные компании из Германии, Франции, США и др. В тройку лидеров по количеству патентов вошел также исследовательский центр Индии (табл. 19).

За исследуемый период в России на технические решения, относящиеся к области «композиты, «иерархические» материалы», выдано 1630 патентов, из которых 316 — резидентам РФ и 1314 (80,61%) — зарубежным заявителям.

Доля патентов с российским приоритетом составляет 1,87% общемирового массива патентов. С этим показателем Россия



© Questel 2014

Рис. 35. Динамика общемирового количества патентов по направлению «композиты, «иерархические» материалы» (данные Orbit на 16.09.2014 г.)

Таблица 19. Топ-10 патентообладателей в области композиционных и «иерархических» материалов (данные Orbit на 16.09.2014 г.)

Патентообладатель	Количество патентов
1. Airbus	169
2. Basf	152
3. Council of Scientific & Industrial Research	132
4. General Electric	131
5. Di Pont de Nemours	106
6. Snecma	106
7. US Department of Energy	101
8. TORAY INDUSTRIES	100
9. JFE Steel	93
10. Hyundai Motor	88

занимает 11-е место в мире, однако разрыв со странами-лидерами — США, Японией, Китаем — весьма существен. Так, от США Россия отстает в 15 раз, от Японии — в 9 раз, от Китая — в 7 раз. Тем не менее следует отметить, что по количеству патентов национальных заявителей Россия находится на одном уровне с такими странами, как Великобритания (391) и Тайвань (379). За пределы РФ вышли 44 патента резидентов, из которых 9 относятся к триадным.

4.7. ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ И АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в WoS проиндексировано 2395 публикаций, посвященных легким сплавам для авиационной и автомобильной промышленности. Анализ динамики публикационной активности свидетельствует о стабильном нарастании интенсивности исследований за период с 2000 по 2012 г. (рис. 36).

Лидерами по доле в общемировом публикационном потоке, отражающем исследования по легким сплавам для авиационной и автомобильной промышленности в WoS, являются Евросоюз и США — на их долю приходится половина статей. Публикационный рейтинг отдельных стран возглавляют США (17,7%). Также в топ-5 стран-лидеров по количеству публикаций вошли Китай (12,5%), Германия (9%), Япония (7,4%), Ю. Корея (6%).

Доля России в общемировом объеме публикаций, проиндексированных в WoS за 2000–2014 гг., составляет 1,71%. Всего 41 статья в WoS имеет аффилиацию с РФ, причем 32% написаны международным авторским коллективом.

В общемировом рейтинге публикационной активности по данному направлению Россия занимает 17-е место, имея показатели, сопоставимые с Польшей, Австралией и Португалией.

За последние 20 лет (1994–2014 гг.) в мире было выдано 544 патента, связанных с технологиями создания и изучения легких сплавов. Динамика патентования за рассматриваемый период говорит о стабильном, хотя и незначительном росте патентной активности по данной теме в мире за пери-

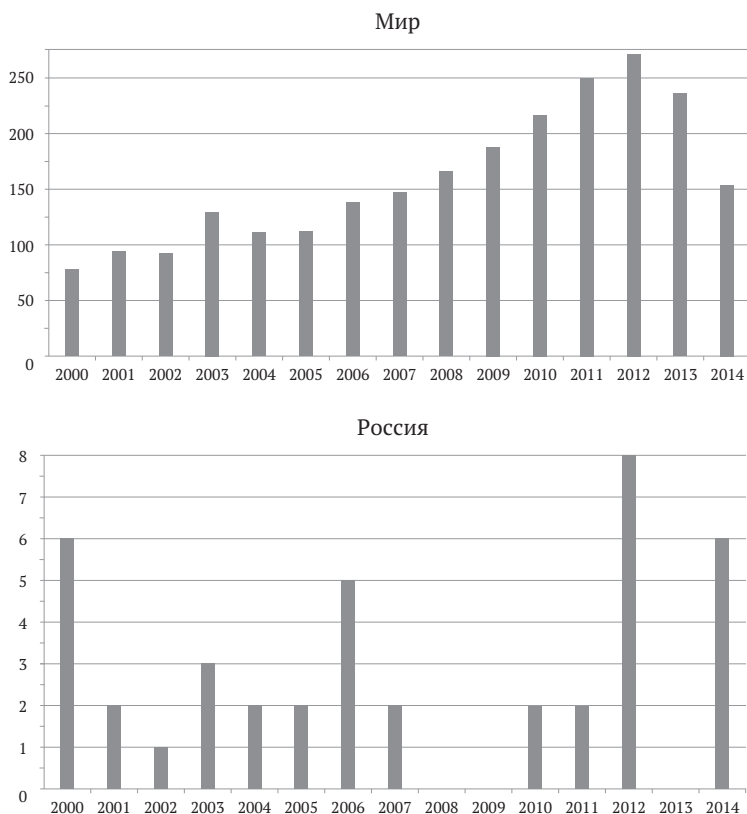
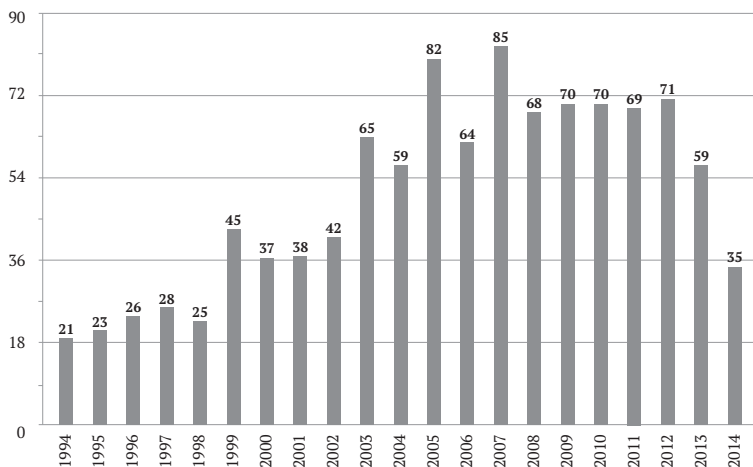


Рис. 36. Динамика общего количества публикаций в мире и в России, связанных с легкими сплавами для авиа- и автомобильной промышленности, 2000–2014 гг. (данные WoS на 04.09.2014)

од с 2000 по 2009 г. с тремя всплесками в 2003, 2005 и 2007 гг. (рис. 37).

В число топ-10 патентообладателей не вошел ни один исследовательский центр мира. Десять верхних позиций рейтинга занимают промышленные компании Японии, США, Германии, Франции и Канады (табл. 20).

Анализ патентной активности российских изобретателей свидетельствует о весьма скромной позиции России среди стран, делающих ставку на развитие данной технической об-



© Questel 2014

Рис. 37. Динамика общемирового количества патентов, связанных с легкими сплавами для авиа- и автомобильной промышленности (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

Таблица 20. Топ-10 патентообладателей в области легких сплавов для авиа- и автомобильной промышленности, 2000–2014 гг. (данные Orbit на 11.09.2014 г.)

Организация	Количество патентов
1. <i>Aleris Aluminum Koblenz</i>	21
2. <i>Daimler</i>	17
3. <i>Alcoa</i>	16
4. <i>Constellium France</i>	13
5. <i>Hitachi</i>	11
6. <i>Alcan</i>	11
7. <i>Toshiba</i>	9
8. <i>Corus Aluminium Walzprodukte</i>	9
9. <i>TDK</i>	8
10. <i>Pechiney Rhenalu</i>	8

ласти. За исследуемый период в РФ было выдано 46 патентов, причем всего 12 из них — заявителям-резидентам и 34 (73,91%) — зарубежным заявителям.

Доля патентов с российским приоритетом составляет 2% общемирового массива. С этим показателем Россия занимает 9-е место в мире, однако разрыв со странами-лидерами (Япония, США, Германия и Китай), на долю которых приходится более 90% всех выданных в мире патентов, весьма существен. За пределы РФ вышли только 4 патента резидентов, один из которых относится к триадным.

4.8. Порошковая металлургия и новые сплавы

За период с 2000 г. по сентябрь 2014 г. в WoS проиндексировано 5825 публикаций, посвященных порошковой металлургии и новым сплавам. Анализ динамики публикационной активности свидетельствует о стабильном нарастании интенсивности исследований за период с 2000 по 2014 г. (рис. 38).

Лидерами по удельному весу в общемировом публикационном потоке, проиндексированном в WoS, являются Евросоюз и Китай, на них приходится 35,3% и 16,5% общего количества публикаций соответственно. Далее идут США с 11% публикаций и Япония с 8,8%.

Доля России в общемировом объеме публикаций, проиндексированных в WoS за 2000–2014 гг., является незначительной и составляет 2,03%. Из 118 статей, имеющих аффилиацию с РФ, 34,8% написаны международным авторским коллективом. В общемировом рейтинге по публикационной активности по данному направлению Россия занимает 16-е место, примерно столько же статей имеют аффилиацию с исследовательскими центрами Сингапура, Тайваня и Австралии.

Динамика патентной активности свидетельствует о стабильной востребованности и продолжающихся поисках новых технологических решений для порошковой металлургии и сплавов: количество ежегодно зарегистрированных патентов за последние 10 лет держится на отметке около 700 патентных документов в год. Всего за последние 20 лет (1994–

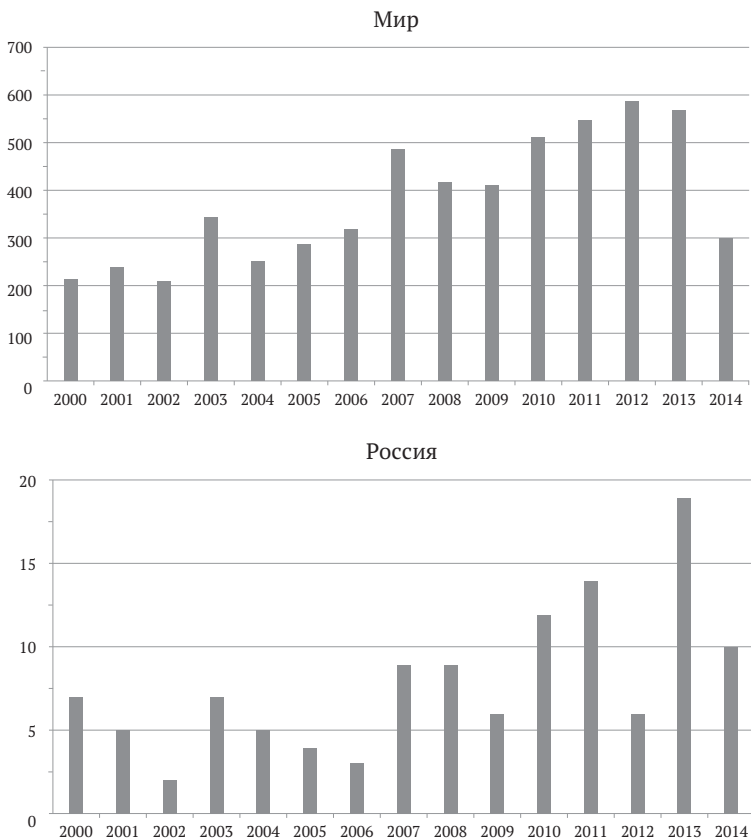
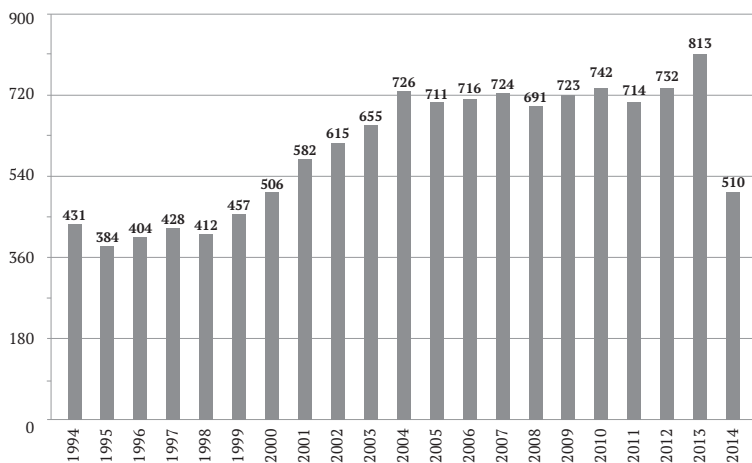


Рис. 38. Динамика общего количества публикаций в WoS по порошковой металлургии и новым сплавам в мире и в России, 2000–2014 гг. (данные WoS на 08.09.2014 г.)

2014 гг.) в мире было выдано 8532 патента, связанных с порошковой металлургией и новыми сплавами (рис. 39).

В число крупнейших патентообладателей в области порошковой металлургии и новых сплавов вошли промышленные компании Японии, Великобритании, Германии и др. (табл. 21).

За исследуемый период в России был выдан 408 патент, причем всего 195 из них российским заявителям, а 210 (51,47%) — зарубежным заявителям. Доля патентов с российским приоритетом составляет 2,28% от общемирового количества патентов.



© Questel 2014

Рис. 39. Динамика общемирового количества патентов, связанных с порошковой металлургией и новыми сплавами (данные Orbit на 16.09.2014 г.)

Таблица 21. Рейтинг крупнейших патентообладателей в области порошковой металлургии и новых сплавов (данные Orbit на 20.09.2014 г.)

Патентообладатель	Количество патентов
<i>Mitsubishi Materials</i>	153
<i>Panasonic</i>	104
<i>Hoeganaes</i>	100
<i>HC Starck</i>	96
<i>Seiko Epson</i>	92
<i>JFE Steel</i>	88
<i>Kawasaki Steel</i>	85
<i>Sumitomo Electric Industries</i>	82
<i>Hitachi Metals</i>	74
<i>Kobe Steel</i>	73

С этим показателем Россия занимает 6-е место в мире, однако разрыв со странами-лидерами (Япония, Китай, США, Южная Корея и Германия), на долю которых приходится более 90% всех выданных в мире патентов по приоритету, весьма существен. За пределы РФ вышли только 7 патентов резидентов, один из которых относится к триадным патентным семьям.

4.9. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты выполненного анализа показывают, что все проанализированные технологические направления являются динамично развивающимися, промышленно применимыми; на протяжении последнего десятилетия по ним сохраняется высокая исследовательская и инженерная активность.

Вместе с тем важно отметить, что развитие данных технологических направлений уже вышло за рамки университетских лабораторий мира и получило новый импульс развития в *R&D*-подразделениях крупных промышленных компаний. В число ведущих патентообладателей по каждому анализируемому направлению входят в основном крупные промышленные компании, на долю которых приходится до 50% патентов, выданных в мире.

Публикационная и патентная активность исследовательских центров и компаний России, к сожалению, не позволяет говорить о наличии конкурентоспособных заделов, которые в краткосрочной перспективе позволят стране занять лидирующие позиции по промышленному производству в областях, являющихся предметом выполненного анализа. Так, доля российских публикаций, проиндексированных в *WoS*, посвященных использованию информационных технологий для управления производственным циклом, составляет всего 0,07% общемирового массива. Наилучший показатель получен для направления «Порошковая металлургия и новые сплавы», но и он составляет чуть более 2%.

Критически низка и доля патентов, полученных резидентами РФ, защищающих технические решения для новых производственных технологий. Особенно низка доля патентов с приоритетом России в области аддитивного производства

(0,14%) и направленной ускоренной разработки новых материалов с заданными свойствами с использованием компьютерного дизайна на основе теоретических моделей и баз данных (0,30%).

Обращает на себя внимание и непропорционально высокая доля иностранных заявителей в общем объеме патентов, зарегистрированных на территории РФ, составляющая по большинству технологий более 50%. Так, 89% патентов РФ, закрывающих решения по аддитивным производствам на территории России, принадлежат иностранным заявителям, главным образом компаниям. Еще более опасная для технологических интересов РФ ситуация складывается в области компьютерного дизайна с использованием теоретических моделей и баз данных для направленной ускоренной разработки новых материалов с заданными свойствами, в которой 94% российских патентов выданы нерезидентам страны (табл. 22).

В число стран — технологических драйверов всех рассмотренных перспективных технологий входят всего четыре страны мира: США, Япония, Китай и Южная Корея. На их долю приходится наибольшее количество патентов, а также триадных патентных семей. Некоторую конкуренцию им могут составить Германия, Франция, Голландия, Тайвань.

Технологические разработки РФ выглядят на фоне лидеров пока очень скромно. Большую тревогу вызывают не столько низкие показатели доли национальных публикаций и патентов (что может быть связано в первую очередь с низким уровнем их интернационализации), сколько отсутствие отечественных технологических драйверов в лице промышленных компаний (в том числе с госучастием). Рейтинги патентообладателей возглавляют инжиниринговые компании, малые и средние предприятия, НИИ РАН, ведущие университеты России, но не крупные промышленные компании.

4.10. ОГРАНИЧЕНИЯ НАУКОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Анализ направлений развития новых производственных технологий на основе библиометрического и патентного анализа свидетельствует о том, что данные методы позволяют по-

Таблица 2.2. Показатели развития перспективных производственных технологий в России, полученные по результатам наукометрического и патентного анализа (данные WoS за период 2000–2014 гг., Orbit за период 1994–2014 гг.

Перспективная производственная технология	Доля патентов с российским приоритетом, выданных в РФ, в общем мировом массиве Orbit, %	Доля патентов, выданных иностранным заявителям, в общем объеме патентов РФ, %	Количество триадных патентов с приоритетом РФ	Страны — технологические лидеры направления
Промышленная и сервисная робототехника	2,83	28,23	1	Япония, США, Китай
Порошковая металлургия и новые сплавы	2,28	51,47	1	Япония, Китай, США, Южная Корея, Германия
Легкие сплавы для авиационной и автомобильной промышленности	2,00	73,90	1	Япония, США, Германия, Китай
Композиты, «иерархические» материалы	1,87	80,61	9	Франция, Германия, США, Япония, Китай
Компьютерные технологии для моделирования и производства изделий	0,81	47,88	0	США, Япония, Китай, Южная Корея
Информационные технологии для управления производственным циклом	0,58	80,00	0	США, Япония, Китай, Южная Корея
Компьютерный дизайн для разработки новых материалов с заданными свойствами	0,30	94,00	0	Китай, США, Япония, Южная Корея
Аддитивное производство	0,14	89,31	0	Южная Корея, Япония, США, Китай

строить общую картину развития на уровне областей, в том числе в динамике, но при переходе на более детальный уровень отдельных организаций (и тем более ученых) могут давать сбои. В частности, выборочная проверка сайтов организаций-лидеров по числу патентов показала, что в ряде случаев в число ведущих российских организаций попали компании, имеющие весьма косвенное отношение к исследуемой научной тематике (например, ООО «Чайка-НН» к тематике разработки новых материалов с заданными свойствами с использованием компьютерного дизайна). В то же время известные и называемые экспертами организации-лидеры не всегда оказываются таковыми по итогам библиометрического анализа.

Значительным ограничением для анализа библиометрических данных оказывается тот факт, что российская наука исторически достаточно слабо интегрирована в мировую науку, что, в частности, проявляется в крайне низком количестве российских публикаций в международных журналах, индексируемых *WoS*.

Сопоставляя результаты анализа международной базы данных *WoS* и российской базы данных РИНЦ, можно отметить ряд существенных различий. Так, если направления композитов и робототехники в обоих базах данных набирают наибольшее количество публикаций, то доля публикаций (в общем количестве по направлениям НПТ) по легким сплавам существенно выше в РИНЦ, это отражает большую внутреннюю ориентацию данного направления развития исследований, что, по-видимому, связано с ее курсом прежде всего на оборонные или двойные технологии в авиации (рис. 40).

Наоборот, в области компьютерного дизайна материалов и аддитивного производства доля публикаций в мировых журналах выше, чем в российских, что, по-видимому, связано с относительной новизной данных направлений и потому преобладанием фундаментальной стадии исследований и разработок, результаты по которой принято публиковать в международных изданиях.

Необходимо также отметить, что если в лидерах по библиометрическим показателям по базе данных *WoS* фигурирует

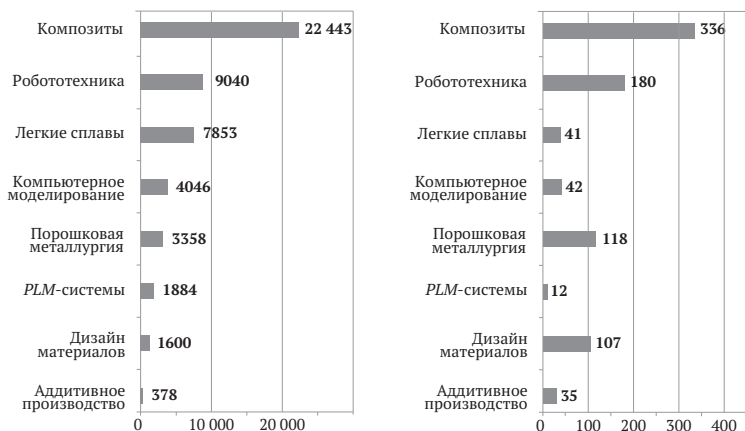


Рис. 40. Количество публикаций по тематике НПТ в РИНЦ за период 1991–2014 гг. (левый график) и WoS за период 2000–2014 гг. (правый график)

много институтов РАН, то по данным РИНЦ верхние строки списков составляют университеты.

Поиск по базе данных РИНЦ зачастую выдает весьма неожиданные результаты. Это связано с тем, что база данных находится на этапе становления, одни организации активно используют ее и пополняют (корректируют) информацию о публикациях своих сотрудников, другие — более пассивны. В результате возникли перекосы и в РИНЦ можно найти немало второстепенных публикаций наряду с отсутствием ключевых по тем или иным направлениям научно-технологического развития. Проблемы РИНЦ постоянно обсуждаются в научном сообществе, база совершенствуется, но пока она не может рассматриваться в качестве полноценного источника достоверной библиометрической информации.

5. Заключение

Анализ направлений, формирующих облик новых производственных технологий, а именно перспективных технологий организации производства и управления им, компьютерных технологий для моделирования и производства изделий, аддитивного производства, промышленной и сервисной робототехники, а также новых материалов, показал, что наряду с общими, связанными в основном с новыми аспектами использования информационных технологий задачами есть и специфические для каждого направления. При этом многие технологии взаимосвязаны и это обуславливает необходимость их одновременного развития (например, материалов для аддитивного производства, компьютерных технологий для управления жизненным циклом изделий и др.). Есть и некоторые общие факторы, влияющие на возможности развития НПТ в стране, касающиеся в основном общего уровня промышленного производства, состояния научных исследований, а также государственного регулирования и бизнес-климата, что влияет на все без исключения сегменты НПТ.

Исследование позволило выявить следующие особенности развития отдельных областей НПТ:

1. В области развития *технологий организации производства и управления им* все более усиливается процесс разделения вещественной и интеллектуальной частей. Происходит оформление интеллектуальной части производства как самостоятельной подотрасли — создание, модернизация и т. д. информационной модели продукта. Растет число компаний, бизнесом которых становятся инженерные услуги, появляются новые особенности его ведения: стандартизация инженерных услуг и как следствие офшорные разработки и существенный рост стоимости интеллектуальной части производства/продукта по отношению к вещественной.

Интеллектуальная часть продукта производства — информационная модель институализируется и все более становится товаром. Она используется не только для изготовления продукта (например, как основа для конструкторско-технологической организации производства), но и для сертификации продуктов и других целей. Вещественная часть производства также меняется: с одной стороны, происходит специализация производителей компонентов сложных изделий/объектов/систем, с другой — сами изделия/объекты/системы все больше становятся продуктами интеграции серийно выпускаемых компонентов (или услуг).

Наконец, происходит дальнейшая глобализация. Становятся глобальными не только цепочки поставщиков, но и процесс создания нового продукта. Место России в этой сфере пока скромное, но есть единичные организации, где используются передовые подходы к организации производства.

2. В области компьютерных технологий для моделирования и производства изделий Россия имеет существенный потенциал развития, поскольку у российских компаний достаточно высокий уровень компетенций, в том числе благодаря опыту работы в качестве поставщиков про-

граммных компонент для мировых лидеров. При этом в мире спрос на средства проектирования со стороны небольших компаний, занимающихся производством в определенных нишах, стабильно растет. Однако в России спрос малого и среднего бизнеса на продукты CAD небольшой и преимущественно крупные компании заинтересованы в использовании CAD, но они работают в основном с зарубежными компаниями. Важна переориентация крупных компаний на отечественных разработчиков, имеющих достаточный потенциал для создания новых продуктов.

3. В области развития промышленной и сервисной робототехники Россия отстает от передовых индустриальных стран по степени использования робототехники в промышленности, несмотря на наличие исследовательских центров, имеющих существенный научно-технический потенциал. Следует отметить, что работающие в области робототехники научные центры, вузы и частные компании производят только отдельные компоненты преимущественно на уровне серийных и предсерийных образцов. Такая ситуация в то же время открывает как минимум две возможности. Во-первых, низкий уровень роботизации отечественного производства может служить фактором роста отечественной роботостроительной отрасли при условии роста обрабатывающих секторов экономики и, в частности тех, где будут востребованы эффективные (в том числе энергоэффективные) средства производства. Во-вторых, высокий уровень спроса на промышленных и сервисных роботов в передовых странах дает возможность отечественным роботостроителям встроиться в глобальные цепочки за счет предложения уникальных, новаторских решений и продуктов (например, техническое зрение, навигация и управление групповым поведением роботов).
4. В области аддитивного производства в мире основные усилия сосредоточены на разработке процессов и материалов, на проработке нормативной базы по внедрению АП. Серьезные проблемы есть в области подготовки ка-

дров. Новое поколение инженеров должно обладать необходимыми компетенциями для работы с принципиально новыми процессами как проектирования объектов, создаваемых с помощью аддитивных технологий, так и непосредственно технологий формообразования и контроля аддитивных процессов.

В России использованием и внедрением технологий аддитивного производства пока занимается небольшое число промышленных компаний и исследовательских центров, у нас недостаточное число компаний располагает мощностями для производства функциональных комплектующих из материалов с хорошими эксплуатационными характеристиками. Еще меньше тех, кто способен производить эти детали в промышленных масштабах. Такая ситуация предположительно связана с высоким уровнем капитальных затрат для закупки АП-оборудования высокого класса, которое к тому же требует наличия соответствующим образом обученного и подготовленного персонала. Другой важный фактор связан с тем, что полноценное использование преимуществ АП в промышленном производстве возможно только при высоком уровне управления жизненным циклом изделий.

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) квалифицированных кадров, (3) доступного АП-оборудования высокого класса и (4) материалов для АП, разработка которых сама по себе является сложной междисциплинарной задачей.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в России может быть разработка программных инструментов и создание АП-материалов, в том числе металлических порошков.

5. В области новых материалов следует особо выделить металлические порошки для аддитивных технологий, PIM-технологии и композиционные материалы.

Область материалов для аддитивных технологий только начинает развиваться, и в ней, без сомнения, развернется острая конкурентная борьба. При этом крайне актуальной областью технологического развития становится разработка технологий получения и обработки металлических порошков, применяемых для наиболее высокотехнологичных приложений аддитивных технологий. Перспективность и интенсивное развитие *PIM*-технологий определяются в значительной степени возможностями оптимизации конструкции детали, увеличением ее плотности и прочности, возможностью придавать поверхностям формируемых изделий варьируемые структуру и свойства, что особенно важно и экономически эффективно для получения изделий сложной геометрической формы и небольшого размера и массы.

Перспективы развития композиционных материалов связаны с развитием двух основных направлений. Первым является управление материалом не только на макро-, но и на нано- и даже атомарном уровнях, что позволяет создавать материалы с более высокими характеристиками. Второе направление касается совершенствования автоматизированных технологий производства композитных конструкций.

Таким образом, развитие новых производственных технологий позволяет промышленности переходить на новые бизнес-модели, принципиально меняя факторы, определяющие конкурентоспособность национальных экономик. Соответственно стимулирование развития новых производственных технологий предполагает сочетание неспецифических мер (государственно-частные партнерства, развитие инфраструктуры, финансирование крупных проектов) и специальных инструментов, поощряющих компании к переходу на современные бизнес-модели управления жизненным циклом изделий, процессов и систем.

Во-первых, в числе специальных мер поддержки можно упомянуть такие, как использование проектных консорциумов, создаваемых с целью разработки и коммерческого освое-

ния, в том числе на мировых рынках, отдельных наиболее перспективных групп продукции на основе единых технико-технологических платформ. В рамках консорциума важно, чтобы были заключены соглашения между компаниями, ориентированными на разработку и производство новых технологий, и крупными компаниями-потребителями, в которых закрепляется согласие крупных компаний на закупку новых технологий и устройств при условии выполнения требований по их функциональности и стоимости. В России проектные консорциумы могут создаваться при использовании опыта и наработанных связей отдельных технологических платформ, особенно тех, где в составе участников есть как производители, так и потребители новых производственных технологий.

Во-вторых, можно рассмотреть возможность создания в России 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. Такие центры, по имеющейся мировой практике, обеспечивают научно-экспертную и образовательную поддержку с фокусом на компании малого и среднего бизнеса. Центры не являются закрытыми структурами. Они могут работать как по заказам проектных консорциумов, так и на внешний рынок.

В-третьих, целесообразна модификация условий в сфере инфраструктурной поддержки. Под модификацией понимается изменение принципов деятельности технопарков и инновационно-технологических центров, функционирующих в стране. Поскольку новые производственные технологии подразумевают кастомизацию и аутсорсинг, возрастает значение связей между малыми и средними компаниями. Их усиление может происходить путем расширения функций малых предприятий по обслуживанию средних и крупных компаний за счет предоставления им в аренду оборудования в технопарках на льготных условиях, а также использования инновационных ваучеров и других мер.

Литература

РАЗДЕЛ 1

1. Дежина И.Г. Перспективные производственные технологии: новые акценты в развитии промышленности / И.Г. Дежина, А.К. Пономарев // Форсайт. 2014. № 2. С. 16–29.

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. <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-advanced-manufacturing-june2011.pdf>.

3. Shipp S.S. Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing / Institute for defense analyses. http://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging_Global_Trends_in_Advanced_Manufacturing.pdf.

4. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report / Wohlers Associates // Wohlers Report. 2013. P. 122–125.

5. International federation for Robotics. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.

6. International federation for Robotics // IFR World Robotics. Industrial Robots 2014. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>

7. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy // McKinsey Global Institute. 2013. С. 74.

8. Sander A. The rise of robotics / A. Sander, M. Wolfgang // Boston consulting group. https://www.bcgperspectives.com/Images/The_Rise_of_Robotics_Aug_2014_tcm80-168791.pdf.

9. Kazmierski C. (2013). Growth Opportunities in Global Composites Industry, 2012–2017.

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

11. Павлов С. CAE-технологии в 2011 г.: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2012. № 4 (72). http://www.cadcamcae.lv/hot/CAE_market_n72_pXX.pdf.

12. CIMdata releases PLM market forecast report // Design Engineering. <http://www.design-engineering.com/cad-cam/cimdata-releases-plm-market-forecast-report-design-eng-112522>.

13. ЦСУ СССР. Народное хозяйство в СССР в 1985 г.: Статистический ежегодник. М.: Финансы и кредит, 1986.

14. Gardner (2014). The World Machine-Tool Output & Consumption Survey.

15. Сапрыкин Д. Л. Российский рынок и производство лазерного технологического оборудования в контексте развития станкостроения. М., 2013.

16. Лабькин А. Сложная композиция // Эксперт Online. <http://expert.ru/2013/07/30/slozhnaya-kompozitsiya/>.

17. Материалы Третьей международной конференции «Композиты и компаунды-2014». <http://www.creonenergy.ru/consulting/detailConf.php?ID=110657>.

18. Воронина Ю. (2012) Сами сделаем // Российская бизнес-газета — промышленное обозрение. <http://www.rg.ru/2012/09/18/materiali.html>.

19. Коцар Ю. (2013) 3D-печать становится мейнстримом // Газета.ru. http://www.gazeta.ru/tech/2013/12/24_a_5817873.shtml.

20. Российское технологическое агентство (2014) / Развитие индустрии робототехники в Российской Федерации / Презентация. <http://rta.gov.ru/1.pdf>.

21. Ждать ли прорыва? // Материалы конференции «Композиты и компаунды-2013». http://www.plastics.ru/pdf/creon_composit_2013.pdf.

22. Княгинин В.Н. Базовая гипотеза промышленного форсайта / Центр стратегических разработок «Северо-Запад». СПб., 2011. http://www.csr-nw.ru/upload/file_content_343.pdf
23. Gardner. Capital Spending Survey // Executive Summary / 2014.

РАЗДЕЛ 2

24. Project of the Future: Industry 4.0 // Ministry of Education and Research, Germany. <http://www.bmbf.de/en/19955.php>.
25. SMLC Forum: Priorities, Infrastructure, and Collaboration for Implementation of Smart Manufacturing // Workshop Summary Report. Oktober, 2012.
26. ManuCloud: The next-generation Manufacturing as a service (MaaS) environment. <http://www.manucloud-project.eu/index.php?id=233>.
27. DEFENSE ACQUISITION GUIDEBOOK. <https://dag.dau.mil>
28. INCOSE Systems Engineering Handbook v. 3.2 // INCOSE-TP-2003-002-03.2. January, 2010.
29. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005 «Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем».
30. Total Cost Management Framework // AACE International. CreateSpace. 2012.
31. INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC/IEEE 29148 First edition 2011–12–01 // Systems and software engineering. — Life cycle processes. — Requirements engineering.
32. ГОСТ — ISO 10007:2003. Руководящие указания по управлению конфигурацией.
33. CMII-105C. CMII Standard for Product Configuration Management // CMII Research Institute. 1986–2010.
34. Project Management Institute. <http://www.pmi.org/>
35. Basic Concepts of Earned Value Management (EVM). <https://www.humphreys-assoc.com/evms/basic-concepts-earned-value-management-evm-ta-a-74.html>.
36. Integrated Project Delivery: A Guide // The American Institute of Architects. <http://www.aia.org/contractdocs/aia077630>.
37. Advancing Interoperability for the Capital Projects Industry: A Vision Paper // FIATECH. February, 2012.

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

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

40. 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 // International Organization for Standardization. Geneva, 2007.

41. An Introduction to ISO 15926. // FIATECH. November, 2011.

42. Вумек Д.П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Д.П. Вумек, Д.Т. Джонс. М.: Альпина Паблишер, 2011.

43. Global Product Development. A PTC Solution // CIMdata, Inc. August, 2014.

44. Business Innovation in Virtual Enterprise Environments. <http://bivee.eu/the-project/>.

45. WHY AN ALLIANCE? // Air Warfare Destroyer Alliance. / Электрон. дан. — Заглавие с экрана. — Режим доступа: <http://www.ausawd.com/content.aspx?p=98>.

46. Manufacturing-as-a-Service: Are We There Yet? Almost. Stephanie Neil // Manufacturing Transformation Blog. <http://www.aprison.com/blog/2013/06/manufacturing-as-a-service-are-we-there-yet-almost/>.

47. Bullinger T. The Industrial Internet // INCOSE. May 16, 2013.

48. Bruner J. Industrial Internet // O'Reilly Media, Inc. 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472 USA.

49. OPTIMIZATION OF MACHINE INTEGRATION // ODVA. OPC Foundation and Sercos International. 2011–2012.

50. National Network for Manufacturing Innovation (NNMI). <http://manufacturing.gov/nnmi.html>.

51. American Lightweight Materials Manufacturing Innovation Institute (ALMMII). <http://almmii.org>.

52. National Center for Defense Manufacturing and Machining. <http://ncdmm.org>.

53. Manufacturing Future with MTConnect + Google Glass + iBlue // TechSolve, Inc. Amit Deshpande. IMTS 2014 Conference, September 8, 2014, Chicago, US.

54. CROSSRAIL IN NUMBERS. <http://www.crossrail.co.uk/benefits/crossrail-in-numbers>.

55. Symons C. The ROI Of Project Portfolio Management Tools. A Total Economic Impact™ (TEI) Analysis Uncovers Significant Benefits. / C. Symons, T. DeGennaro, M. Visitation. // Forrester Research, Inc. 2009. <https://www.forrester.com/Program-&-Project-Management/research?sort=3&range=504005&N=10001%2020234&access=0&page=3>.

56. Cost analysis of inadequate interoperability in the US capital facilities industry // NIST. 2004.

57. CAD Trends. 2009. http://www.business-advantage.com/landing_page_CAD-Trends.php.

58. Satell G. Why Autodesk Is Investing In The Democratization Of Design. 2014. <http://www.forbes.com/sites/gregsatell/2014/09/02/why-autodesk-is-investing-in-the-democratization-of-design/>.

59. Ogewell V. We want to change the way people work — TV Report. 12 December 2013 / V. Ogewell, C. Bass. <http://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/6808/Autodesks-CEO-Carl-Bass-We-want-to-change-the-way-people-work-TV-Report.aspx>.

60. Hayes J. Chuck Grindstaff on how Siemens gets the core of PLM right. 29 April 2013. <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/5651/Chuck-Grindstaff-on-how-Siemens-gets-the-core-of-PLM-right.aspx>.

61. Павлов С. CAE-технологии в 2013 г.: обзор достижений и анализ рынка // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. № 4. С. 8–18.

62. Johnson N.S. MSC Aims to Take CAE from Frustrating to Efficient, 1 October 2014. <http://www.cadalyst.com/testing-analysis/cae/msc-aims-take-cae-frustrating-efficient-20560>.

63. Выручка «Аскон» по итогам 2013 г. составила 983 млн руб. 2 апреля 2014 // CNews. <http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2014/04/02/566505>.

64. Stackpole B. Boeing's Global Collaboration Environment Pioneers Groundbreaking 787 Dreamliner Development Effort. 15 May 2007. http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=225598.

65. *Smith A.* AI, Robotics, and the Future of Jobs / A. Smith, J. Anderson // Evernote. <http://www.pewinternet.org/2014/08/06/future-of-jobs/>

66. *Manyika J.* Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. / J. Manyika, M. Chui, J. Bughin, R. Dobbs, P. Bisson, A. Marrs // McKinsey&Company: Insights & Reports. 2013. http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies.

67. *Кутеев Н.Ю.* Презентация Российского технологического агентства в ходе круглого стола «Государственная поддержка робототехнической отрасли в России» на форуме Иннопром-2014 в Екатеринбурге. 2014.

68. Partnership for robotics in Europe. <http://sparc-robotics.eu>.

69. Abenomics to Robonomics. // Asia one Asia. 2014. <http://news.asiaone.com/news/asia/abenomics-robonomics?nopaging=1>.

70. Technology: Eyes in the sky. 2013. <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/b42e4e34-0bfa-11e3-8840-00144feabdc0.html>.

71. World Robotics 2014. Service Robots. P. 21–25. Таблица 2.1–2.2.

72. International federation for robotics. Industrial Robot Statistics. 2013. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.

73. *Woolcock K.* Apple's Revolutionary Move Into Robotic Manufacturing. 2012. <http://seekingalpha.com/article/658711-apple-s-revolutionary-move-into-robotic-manufacturing>.

74. *Brynjolfsson E.* The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. / E. Brynjolfsson, A. McAfee.

75. Lean Automation. Welcome to the LIAA Project. <http://www.project-leanautomation.eu>.

76. *Lucier J.* Automation for Lower Volume Parts. Methods Machine Tools, Inc. // IMTS2014 Conference. Chicago, USA. September 9, 2014.

77. Tesla Factory. http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Factory.

78. Factory in a day. <http://www.factory-in-a-day.eu>.

79. Universal Robots. http://media1.limitless.dk/UR_Manual/UR5_Safety_Manual/UR5_Safety_Manual_GB.pdf.

80. RETHINK ROBOTICS — FINDING A MARKET. // Stanford University School of Engineering. <http://web.stanford.edu/class/ee204/Publications/Rethink%20Robotics%202013-204-1.pdf>.

81. Top 10 take-aways from AUTOMATICA 2014. <http://www.therobotreport.com/news/top-10-take-aways-from-automatica-2014>.

82. *Kara D.* Rio Tinto Leads, Others Follow, on Road to Fully Automated Mining. 2014. <http://www.arisplex.com/analysis/rio-tinto-leads-others-follow-rad-fully-automated-mining/>

83. *Parreira J., Meech J.* Autonomous Haulage Systems — Justification and Opportunity // Autonomous and Intelligent Systems. Lecture Notes in Computer Science. 6752. 2011. P. 63–72.

84. *Chazan G.* Terrifying' oil skills shortage delays projects and rises risks. 2014. <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/cf831e0c-006f-11e4-a3f2-00144feab7de.html#axzz3EOvmWJC9>

85. Next-generation mining: People and technology working together / Rio Tinto / Mine of the Future. http://www.riotinto.com/documents/Mine_of_The_Future_Brochure.pdf.

86. *Hume N.* Automation keeps Rio in the driving seat. <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/1c799b4a-5cf9-11e1-ac80-00144feabdc0.html#axzz3EOvmWJC9>.

87. Strategic Research Agenda For Robotics in Europe 2014–2020 / SPARC. http://www.eu-robotics.net/cms/upload/PPP/SRA2020_SPARC.pdf.

88. Global Map. <http://www.therobotreport.com/map>.

89. *Gupta S.K.* National Robotics Initiative. Overview. http://nsfmanufacturingfaculty.eng.usf.edu/index_htm_files/NSF%20NRI%20Overview%20for%20AMP.pdf.

90. <http://sparc-robotics.eu/>

91. «France Robots Initiative»: un plan de soutien a la filiere robotique. <http://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/20130320.OBS2467/france-robots-initiative-un-plan-de-soutien-a-la-filiere-robotique.html>.

92. *Crowe S.* RAS 2020: The \$257M Plan to Jumpstart UK Robotics. http://www.roboticsbusinessreview.com/article/ras_2020_the_257m_plan_to_jumpstart_uk_robotics.

93. Robot Revolution Realization Council. http://japan.kantei.go.jp/96_abe/actions/201409/11article4.html.

94. *Tian W.* Robots help counter soaring labor costs. http://www.chinadaily.com.cn/china/2013-11/14/content_17103496.htm.

95. Development of a Fully Fledged Robotics Industry through Convergence with Other Industries costs. http://www.motie.go.kr/language/eng/news/news_view.jsp?seq=1270&srchType=1&srchWord=&tableNm=E_01_01&pageNo=2&ctx

96. ASTM Standard // Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Vol. 10.04.

97. Additive Manufacturing Study Shows Cuts in Material Consumption and Reduced CO₂ Emissions // Powder Metall Rev. 2013. <http://www.ipmd.net/articles/002490.html>.

98. *Holmstrom J.* Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approaches to Capacity Deployment / J. Holmstrom, J. Partanen, H. Tuomi, M. Walter // Journal of Manufacturing Technology Management. 2010. № 21 [6]. P. 687–697.

99. *Bourell D.L.* Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D.L. Bourell, J.J. Beaman, Jr., M.C. Leu, D.W. Rosen // U.S. Turkey Workshop on Rapid Technologies. 2009.

100. Hype Cycle for Emerging Technologies. 2012. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315>.

101. *Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J., Skerlos S.J.* Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing, J. Clean Prod., 15, 932–943 (2007).

102. *Wray P.* Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out, Amer. Ceram. Soc. Bull., 93 [3], 17–23 (2014).

103. *Hopkinson N.* Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age, Chichester England: John Willey / N. Hopkinson, R. Hague, P. Dickens / 2006.

104. Wohlers Report 2013 // Wohlers Associates. 2013.

105. *Nee A.Y.C.* On the Improvement of the Stereolithography (SL) Process / A. Y. C. Nee, J. Y. H. Fuh, T. Miyazawa // J. Mater. Process. Techn. 2001. № 113 [1–3]. P. 262–268.

106. *Skoog S.A.* Stereolithography in Tissue Engineering / S.A. Skoog, P.L. Goering, R.J. Narayan // J. Mater. Sci: Mater Med. 2014. № 25. P. 845–856.

107. *Petrovic V.* Additive Layered Manufacturing: Sectors of Industrial Application Shown Through Case Studies / V. Petrovic, J. Vicente, H. Gonzalez, O.J. Fernando, J.D. Gordillo, J.R.B. Puchades, I.P. Grinan // Int. J. Production Res. 2011. № 49 [4]. P. 1061–1079.

108. *Sood A.K.* Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modeling Processed Parts / A.K. Sood, R.K. Ohdar, and S.S. Mahapatra // Materials & Design. 2010. № 31 [1]. P. 287–295.

109. *Wang J.* Rheological and Extrusion Behavior of Dental Porcelain Slurries for Rapid Prototyping Applications. / J. Wang, I.L. Shaw // Mater. Sci & Eng. № 397 [1–2]. 2005. P. 314–321.

110. *Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P.* Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modeling // *J. Mater. Proc. Tech.* 2001. № 118 [1–3]. P. 385–388.

111. *Thrimurthulu K., Pandey P.M., Venkata Reddy N.* Optimum Part Deposition Orientation in Fused Deposition Modeling // *J. Machine Tools and Manufacture.* 2004. № 44 [6]. P. 585–594.

112. *Senthilkumaran K., Pandey P.M., Rao P.V.M.* Influence of Building Strategies on the Accuracy of Parts in Selective Laser Sintering // *Materials & Design.* 2009. № 30 [8]. P. 2946–2954.

113. *Kruth J.P., Levy G., Klocke F., Childs T.H. C.* Consolidation Phenomena in Laser and Powder-bed Based Layered Manufacturing // *Annals CIRP.* 2007. № 56. P. 730–759.

114. *Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R.* Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes, and Mechanisms // *Inter. Mater. Rev.* 2012. № 57 [3]. P. 137–164.

115. *Harrysson O.L. A., Cansizoglu O., Marcellin-Little D.J., Cormier D.R., West II H.A.* Direct Metal Fabrication of Titanium Implants with Tailored Materials and Mechanical Properties Using Electron Beam Melting Technology // *Mater. Sci & Eng.* 2008. № 28 [3]. P. 366–373.

116. *Collins S.* 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.

117. *Mueller B., Kochan D.* Laminated Object Manufacturing for Rapid Tooling and Patternmaking in Foundry Industry // *Computers in Industry.* 1999. № 39 [1]. P. 47–53.

118. *Frazier W.E.* Metal Additive Manufacturing: A Review // *J. Mater. Eng. Performance.* 2014. № 23 [6]. P. 1917–1928.

119. ATKINS Project: A Low Carbon Manufacturing Solution, Loughborough // University Project No: N 0012J (2007). <http://www.atkins-project.com/>.

120. *Luo Y., Ji Z., Leu M.C., Caudill R.* Environmental Performance Analysis of Solid Freeform Fabrication Processes, IEEE 0–7803–5495–8/99 (1999).

121. *Kellens K., Yasa E., Dewulf W., Kruth J.P., Duflou J.R.* Energy and Resource Efficiency of SLS/SLM Processes, Proceedings of Twenty-Second International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011.

122. *Bibb R., Winder J.* A Review of the Issues Surrounding Three-Dimensional Computed Tomography For Medical Modeling Using Rapid Prototyping Techniques // *Radiography*. 2010. № 16 [1]. P. 78–83.

123. *Sodian R., Loebe M., Hein A., Martin D.P., Hoerstrup S.P., Potapov E.V., Hausmann H., Leith T., Hetzer R.* Application of Stereolithography for Scaffold Fabrication for Tissue Engineered Heart Valves // *ASAIO J.* 2002. № 48 [1]. P. 12–18.

124. *Sodian R., Fu P., Lueders C., Szymanski D., Fritsche C., Gutberlet M., Hoerstrup S.P., Hausman H., Lueth T., Hetzer R.* Tissue Engineering of Vascular Conduits: Fabrication of Custom-Made Scaffolds Using Rapid Prototyping Techniques // *Thorac Cardiovasc. Surg.* 2005. № 53 [3]. 144–153.

125. 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).

126. 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).

127. 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, 510–51 (2004).

128. 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).

129. Parts Without Limits: Additive Manufacturing, (mini feature), *Assem. Automat.*, 31 [3] (2011).

130. *Vandenbroucke B., Kruth J.-P.* Selective Laser Melting of Biocompatible Metals for Rapid Manufacturing of Medical Parts // *Rapid Prototyp. J.* 2007. № 13 [4]. P. 96–203.

131. *Freedman D.H.* Layer by Layer // *MIT Tech. Rev.* 2012. № 115 [1]. P. 50–53.

132. *Ehrenberg R.* The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time // *Science News*. 2013. № 183 [5]. P. 20–25.

133. Lamborghini Gallardo Headlight Washer Cover Flap // CRP Group. <http://www.crp.eu/PDF/cs-gallardo-headlight-washer-cover-flap.pdf>.

134. *Zhai Y., Lados D.A., Lagoy J.L.* Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation // JOM. 2014. № 66 [5]. P. 808–816.
135. World's First 3-D Printed Car <https://localmotors.com/localmotors/the-3D-printed-car-aka-direct-digital-manufacturing/>.
136. URBEE2. <http://korecologic.com/>.
137. *Atzeni E., Salmi A.* Economics of Additive Manufacturing For End-Usable Metal Parts // Int. J. Adv. Manuf. Tech. 2012. № 62 [9]. P. 1147–1155.
138. *Travitzky N., Bonet A., Dermeik B., Fey T., Filbert-Demut I., Schlier L., Schlordt T., Greil P.* Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials // Adv. Eng. Mater. 2014. № 16 [6]. P. 729–753.
139. *Wray P.* Industry Embraces Ceramic Additive Manufacturing — Layer by Layer // Amer. Ceram. Soc. Bull. 2014. № 93 [3]. P. 24–27.
140. *Endo M., Strano M.S., Ajayan P.M.* Potential Applications of Carbon nanotubes // Topics in Applied Physics. 2008. № 111. P. 13–61.
141. *McDowell D., Panchal J., Cho H.-J., Seepersad C., Allen J., Mistree F.* Integrated Design of Multiscale, Multifunctional Materials and Products. Elsevier. 2006.
142. *Liu Z.-K., Chen L.-Q., Raghavan P., Du Q., Sofo J.O., Langer S.A., Wolverton C.* An integrated framework for multi-scale materials simulation and design // Journal of Computer-Aided Materials Design. 2004. Vol. 11. Is. 2–3. P. 183–199.
143. *Holdren J.P.* Strategic Plan of the Materials Genome Initiative Materials Genome Initiative National Science and Technology Council Committee on Technology // Executive Office of the President National Science and Technology Council Washington, D.C. 20502. December 4. 2014.
144. Materials Genome Initiative Turns Three // Continues Path to Revitalize American Manufacturing. June 19. 2014.
145. *Holdren J.P.* Report of Materials Genome Initiative for Global Competitiveness // Executive Office of the President National Science and Technology Council Washington, D.C. 20502. June 24. 2011. [http://\(available via http://go.nature.com/Rkw2mj](http://(available via http://go.nature.com/Rkw2mj)
146. *Glotzer S.C.* World Technology Evaluation Center, Panel Report on international assessment of research and development in simulation-based engineering and science. Baltimore, Maryland 2110.
147. *Brown D.L.* Applied mathematics at the U.S. Department of Energy: Past, present and a view to the future. May, 2008.

148. Oden J.T., Belytschko T., Fish J., Hughes T.J.R., Johnson C., Keyes D., Laub A., Petzold L., Srolovitz D., Yip A. Simulation-based engineering science: Revolutionizing engineering science through simulation. 2006. Arlington, VA: National Science Foundation.

149. Lakes R. Materials with structural hierarchy // *Nature*. 1993. № 361. P. 511–515.

150. Chen A. Y., Deng Z., Billings A.N., Citorik R.J., Zakeri B., Lu T.K., Seker U.O. S., Lu M. Y. Synthesis and patterning of tunable multiscale materials with engineered cells // *Nature Materials*. 2014. 13. 515–523. doi:10.1038/nmat3912.

151. Yip S., Short M.P. Multiscale materials modelling at the mesoscale // *Nature Materials*. 2013. 12. 774–777. doi:10.1038/nmat3746.

152. The Exploratory Advanced Research Program: Multiscale Materials Modeling, Workshop summary report, April 23–24, 2013. Federal Highway Administration's, Publication No. FHWA-HRT-13–103 (HRTM-30/01–14 (1M) E).

153. Fish J. Multiscale Methods: Bridging the Scales in Science and Engineering Buehler M.J., Xu Z. Materials science: Mind the helical crack // *Nature*. 2010. 464. P. 42–43. doi:10.1038/464042a.

154. Yao Y., Gao H. Multi-scale cohesive laws in hierarchical materials // *International Journal of Solids and Structures*. 2007. Vol. 44. Is. 24–26. P. 8177–8193.

155. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. Ч. 1. Физические основы многоуровневого подхода // *Физическая мезомеханика*. 2006. Т. 9. № 3. С. 9–22.

156. Hao S., Moran B., Liu W.K., Olson G.B. A hierarchical multi-physics model for design of high toughness steels // *Journal of Computer-Aided Materials Design*. 2003. Vol. 10. Is. 2. P. 99–142.

157. Landis D.D., Hummelshoj J.S., Nestorov S., Greeley J., Dulak M., Bligaard T., Norskov J.K., Jacobsen K.W. The Computational Materials Repository // *Computing in Science and Engineering*. 2012. № 14 (6). P. 51–57. doi:10.1109/MCSE.2012.16.

158. Bahn S.R., Jacobsen K. W. An Object-Oriented Scripting Interface to a Legacy Electronic Structure Code // *Computing in Science and Engineering*. 2002. № 4 (3). P. 56–66.

159. *Demkowicz M.J., Bellon P., Wirth B.D.* Atomic-scale design of radiation-tolerant nanocomposites. // MRS Bulletin. Vol. 35. Is. 12. December 2010. P. 992–998.
160. Cambridge University Press. doi: <http://dx.doi.org/10.1557/mrs2010.704>.
161. Nanoscale Materials. Editors: Luis M. Liz-Marzán, Prashant V. Kamat. Springer, 2003.
162. <http://chemistry.mit.edu/research/materials-nanoscience>.
163. *Lu H., Huang W.M., Liang F., Yu K.* Nanoscale Design of Nano-Sized Particles in Shape-Memory Polymer Nanocomposites Driven by Electricity // Materials. 2013. № 6. P. 3742–3754. doi:10.3390/ma6093742.
164. <http://www.sandia.gov/pcnsc/research/nano.html>.
165. *Mishnaevsky Jr. L.* Micromechanical analysis of nanocomposites using 3D voxel based material model // Composites Science and Technology. 2012. № 72. P. 1167–1177.
166. *Ditlevsen O., Madsen H.* Structural reliability analyses. Wiley & Sons, Chichester, 1996.
167. *Chiachio M., Chiachio J., Rus G.* Reliability in composites — A selective review and survey of current development // Composites: Part B. 2012. № 43. P. 902–913.
168. *Yin H.M., Sun L.Z., Paulino G.H.* Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions // Acta Materialia. 2004. № 52. P. 3535–3543.
169. *Mahesh S., Beyerlein I.J., Phoenix S.L.* Size and Heterogeneity Effects on the Strength of Fibrous Composites // Physica D. 1999. Vol. 133. P. 371–389.
170. *Aboudi J., Arnoldi S. M., Bednarczyk B. A.* Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach. Butterworth-Heinemann, 2012.
171. Engineering Design Reliability Handbook. Efstratios Nikolaidis, Dan M. Ghiocel, Suren Singhal. CRC Press. 2014.
172. *McDowell D.L., Panchal J., Choi H.-J., Seepersad C., Allen J., Mistree F.* Integrated Design of Multiscale, Multifunctional Materials and Products. Butterworth-Heinemann, 2009.
173. *George I.N.* Rozvany, Tomasz Lewinski. Topology Optimization in Structural and Continuum Mechanics. Springer Science & Business Media, 2013.

174. Уэйн Р. Основы и применения фотохимии. М.: Мир, 1991.
175. Дряхлов Е. Брак по расчету // КОМПАС промышленной реструктуризации. Оборудование. 2003. № 3. <http://www.compass-r.ru/dijest/novermber/d-9-10.htm>.
176. Handbook of Metal Injection Molding. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering / D. Heaney (ed.) // Elsevier. 2012.
177. Murray K. Sandvik Osprey Ltd. at the EuroMIM Open Meeting. October 10. 2010; PIM International. Vol. 4. No. 4. December 2010. <http://www.pim-international.com/aboutpim#sthash.pwd7NsZE.dpuf>.
178. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. 2012.
179. Data Sheet Catamold 42CrMo4// BASF SE GBU Inorganic Specialties. D/CA 009 e March 2010.
180. Kamal M.R., Isayev A.I., Liu S.-J. (2009). Injection Molding — Technology and Fundamentals / White J.L. (ed.) Carl Hanser Verlag, Munich, DOI:10.3139/9783446433731.
181. Vijay Subramanian. Metal and ceramic injection molding // BCC Research. AVM049C. January 2014.
182. Randall M. German. Progress in Titanium Metal Powder Injection Molding // Materials. 2013. 6. 3641–3662; doi:10.3390/ma6083641.
183. Lee J.-S., Choi J.-P., Lee G.-Y. Consolidation of Hierarchy-Structured Nanopowder Agglomerates and Its Application to Net-Shaping Nanopowder Materials // Materials. 2013. 6. 4046–4063.
184. You W.-K., Choi J.-P., Yoon S.-M., Lee J.-S. Low temperature powder injection molding of iron micro-nano powder mixture // Powder technology. 2012. Vol. 228. P. 199–205.
185. Tirta A., Prasetyo Y.; Baek E.-R., Choi C.-J., Lee H.-M. Advanced Micromanufacturing for Ultra Precision Part by Soft Lithography and Nano Powder Injection Molding // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. Vol. 3 № 5. P. 246–249.
186. Javad Rajabi, Norhamidi Muhamad, Abu Bakar Sulong. Effect of nano-sized powders on powder injection molding: a review // Microsyst Technol. 2012. 18:1941–1961.
187. Заславский А.Я., Симанов А.Н., Дубровин А.С. и др. Хладно-стойкая модифицированная литая сталь и способ ее производства // Патент РФ № 2175993. 20.11.2001.

188. Калинина Н.Е., Кавац О.А., Калинин В.Т. Модифицирующая обработка литейных силуминов дисперсными композициями // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 7 (54). С. 16–19.

189. Калинина Н.Е., Кавац О.А., Калинин В.Т. Повышение технологических свойств литейных алюминиевых сплавов при модифицировании нанодисперсными частицами // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 4 (71). С. 17–20.

190. Калинина Н.Е., Калиновская А.Е., Калинин В.Т., Дудников А.С. Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. № 7 (94). С. 23–26.

191. Mathew B.A., Mastromatteo R. Metal injection molding for automotive applications // Metal Powder Report. Vol. 57. Is. 3. March 2002. P. 20–23.

192. German R.M. Metal Injection Molding, A Comprehensive MIM Design Guide; Metal Powder Industries Federation: Princeton, NJ, USA, 2011.

РАЗДЕЛ 3

193. A Blueprint for an America Built to Last. Jan.2012. The White House. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/blueprint_for_an_america_built_to_last.pdf

194. Manufacturing the Future. Federal Priorities for Manufacturing R&D. Report of the Interagency Working Group on Manufacturing R&D Committee on Technology. National Science and Technology Council. March 2008.

195. Shipp S., Gupta N., Lal B. et al. Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing. Institute for Defense Analyses. IDA Paper P-4603. March 2012.

196. President Obama Launches Advanced Manufacturing Partnership Steering Committee «2.0» // The White House. Office of the Press Secretary. September 26, 2013. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/09/26/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership-steering-com>.

197. Materials Genome Initiative for Global Competitiveness. June 2011 Executive Office of The President. National Science and Technology

Council. June 24, 2011. http://manufacturing.gov/amp_docs/materials_genome_initiative-final.pdf.

198. National Network for Manufacturing Innovation: A Preliminary Design. Executive Office of the President. National Science and Technology Council. Advanced Manufacturing National Program Office. January 2013.

199. Request for Information (RFI). Institutes for Manufacturing Innovation. Solicitation Number: RFI-RQKM-2014-0022. Agency: Department of the Air Force. Office: Air Force Materiel Command. Location: AFRL/RQK — WPAFB. Solicitation Number: RFI-RQKM-2014-0022. Notice Type: Special Notice. Synopsis: Added: Jun 02, 2014 12:33 pm. https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=a7164526bc50831cf399e5a349c73D4c&tab=core&_cview=1.

200. When America makes — America works. <https://americamakes.us>.

201. *Weisgerber M.* DoD to Support Advanced Manufacturing Projects // Defense News. Feb. 17, 2013. <http://www.defensenews.com/article/20130217/DEFREG02/302170009/DoD-Support-Advanced-Manufacturing-Projects?odyssey=tab|topnews|text|FRONTPAGE>.

202. Remarks by the President in the State of the Union Address. The White House. Office of the Press Secretary. 2013. Feb. 12. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address>.

203. Obama Administration Launches Competition for Three New Manufacturing Innovation Institutes // The White House. Office of the Press Secretary. May 09, 2013. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/05/09/obama-administration-launches-competition-three-new-manufacturing-innova>.

204. Elsevier (2013) International Comparative Performance of the UK Research Base — 2013.

205. World University rankings 2014–2015 Out now. // Times Higher Education World University rankings 2014–2015. <http://www.timeshighereducation.co.uk/world-university-rankings/>.

206. *Wessner C. W.* (2013) 21st Century Manufacturing: The Role of the Manufacturing Extension Partnership Program. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=18448.

207. House of Commons. Science and Technology Committee (2011) Technology and Innovation Centres. Second Report of Session 2010–11.

Volume II. Additional written evidence. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201011/cmselect/cmsctech/619/619vw.pdf>.

208. House of Commons. Science and Technology Committee (2011) Technology and Innovation Centres. Second Report of Session 2010–11. Volume I: Report, together with formal minutes, oral and written evidence. <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201011/cmselect/cmsctech/619/619.pdf/>

209. HM Government (2009) New Industry, New Jobs. Building Britain's Future. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20101227023510> <http://www.bis.gov.uk/files/file51023.pdf>.

210. Hauser H. (2010) The Current and Future Role of Technology and Innovation Centres in the UK. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20121212135622/http://www.bis.gov.uk/assets/biscore/innovation/docs/10-843-role-of-technology-innovation-centres-hauser-review>.

211. What is a Catapult and how Catapult Centres can help you and your next big idea // Technology strategy board. <https://www.catapult.org.uk/documents/2155693/2268412/What+is+a+Catapult/e68c7c90-39e0-45b7-be4b-9ba1e1c51232?version=1.2>.

212. CBI submission: Hauser review of medium term strategy for Catapult centres. // Technology strategy board. 2014. http://www.cbi.org.uk/media/2837252/2014.05.30_cbi_submission_to_hauser_review_of_catapults.pdf.

213. Collaborative success for UK manufacturing // Racounter. 2014. <http://raconteur.net/business/collaborative-success-for-uk-manufacturing>.

214. The Innovate UK website is temporarily unavailable but will be back shortly // Innovative UK. Technology Strategy board. 2014. <https://www.innovateuk.org/-/technology-entrepreneur-on-board-to-help-catapult-centres-scale-new-heights>.

215. Russell International Excellence Group (2014) Hauser Review of the Catapult Centres. Evidence from the Russell Group. <http://www.russellgroup.ac.uk/uploads/50-Russell-Group-submission-to-Hauser-Review-of-the-Catapult-Centres.pdf>.

216. Advanced Manufacturing Supply Chain Initiative Fund // European Commission: Enterprise and Industry. <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/policy/regional-innovation/monitor/support-measure/merseyside/advanced-manufacturing-supply-chain-initiative-fund>.

217. HM Government (2014) Industrial Strategy. Government and Industry in Partnership. Progress Report.

218. Nationale Roadmap Embedded Systems // BITCOM http://www.bitkom.org/files/documents/NRMES_2009_einseitig.pdf.

219. Zukunftsprojekte der Bundesregierung // Die Bundesregierung. Hitech-Strategie. <http://www.hightech-strategie.de/de/Zukunftsprojekte-der-Bundesregierung-972.php>.

220. Hightech Strategie 2020 // Research in Germany. <http://www.research-in-germany.de/dms/Downloads-DE/dachportal-de/02...Hightech-Strategie/BMBF-Die-Hightech-Strategie-f-r-Deutschland-2006/BMBF%20Die%20Hightech-Strategie%20f%C3%BCr%20Deutschland%202006.pdf>.

221. Aus Ideen schneller Innovationen machen // Bundesministerium für Bildung und Forschung. 03.09.2014. <http://www.bmbf.de/press/3650.php>.

222. Zukunftsprojekt Industrie 4.0 // Bundesministerium für Bildung und Forschung. 18.08.2014. <http://www.bmbf.de/de/9072.php>.

223. Staatssekretär Burgbacher startet BMWi-Technologieprogramm «AUTONOMIK für Industrie 4.0» // Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 05.10.2012. <http://www.autonomik.de/de/1007.php>.

224. Zypries startet neues Technologieprogramm für die Industrieproduktion von morgen // Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 17.06. 2014. <http://www.autonomik40.de/1905.php>.

225. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10002/#/DLR/Start/About>.

226. Industrie-4.0-Förderung fast nur für die Großen // Elektronik.net, 06.08.2014. <http://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/strategien-trends/artikel/111743/>.

227. Приказ Минпромнауки РФ от 11.02.2002 г. № 22 «Об организации в Минпромнауки России работы по подготовке предложений по проектам (программам), имеющим особо важное государственное значение».

228. Дежина И., Симачев Ю. Связанные гранты для стимулирования партнерства компаний и университетов в инновационной сфере: стартовые эффекты применения в России // Журнал новой экономической ассоциации. 2013. № 3. С. 99–122.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за замечания, дополнения и предложения, которые существенным образом помогли улучшить доклад: Авдееву В. В. (НПО «Унихимтек»), Андриченко А. Н. (ЗАО «SDI Solution»), Антонову Ф. К. (Сколковский институт науки и технологий), Бахину Е. В. (АСКОН), Боровкову А. И. (НИУ СПбГПУ), Брызгалову А. А. (ООО «Унискан»), Величко Г. П. (ОАО «Российская промышленная коллегия»), Голкару А. (Сколковский институт науки и технологий), Ершову А. Г. (ЗАО «Ледас»), Каширину А. И. (ГК «Ростехнологии»), Клебанову Д. (ООО «Вист Майнинг Технолоджи»), Костромину К. А. (ОАО «ОАК»), Каталевскому Д. Ю. (Сколковский институт науки и технологий), Кузнецову Е. Б. (ОАО «РВК»), академику Кулешову А. П. (Институт проблем передачи информации РАН), Левину В. А. (ООО «Фидесис»), Левину И. И. (Национальный институт стандартов и технологий), Малахо А. П. (НПО «Унихимтек»), Манцевичу Н. М. (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»), Морозову С. М. (DATADVANCE), Николасу А. В. (ООО «СМВ Инжиниринг»), Оспенниковой О. Г. (ВИАМ), Рогачеву М. Б. (РФТР), Сапрыкину Д. Л. (ЗАО НИИ ЭСТО), Солобоеву С. В. (ООО «Унискан»), Тутушкину А. С. (ООО «Фидесис»), Ухлинову Л. М. (ТП «Национальная программная платформа»), Ушакову А. Е. (НТИЦ «АпАТЭК-Дубна»), Фертману А. Д. (фонд «Сколково»), Ханьжиной Ю. Б. (Минпромторг РФ), Чуйко Г. В. (ОАО «Воронежсельмаш»), Шелофасту В. В. (НТЦ АПМ), Щедрину И. С. (УК «Воронежсельмаш»).

Научная литература

Заказное издание

Новые производственные технологии

Публичный аналитический доклад

Выпускающий редактор *Е. В. Попова*

Редактор *В. Л. Ларина*

Корректор *Ф. Н. Морозова*

Художник *Е. В. Трушина*

Оригинал-макет *О. З. Элоев*

Компьютерная верстка *А. И. Попов*

Подписано в печать 31.03.2015. Формат 60×90 1/16.

Гарнитура PT Serif Pro. Усл. печ. л. 17,0.

Тираж 300 экз. Заказ № 288.

Издательский дом «Дело» РАНХиГС

119571, Москва, пр-т Вернадского, 82

Коммерческий центр – тел. (495) 433-25-10, (495) 433-25-02

www.ranepa.ru

delo@ranepa.ru

Отпечатано в типографии РАНХиГС

119571, Москва, пр-т Вернадского, 82