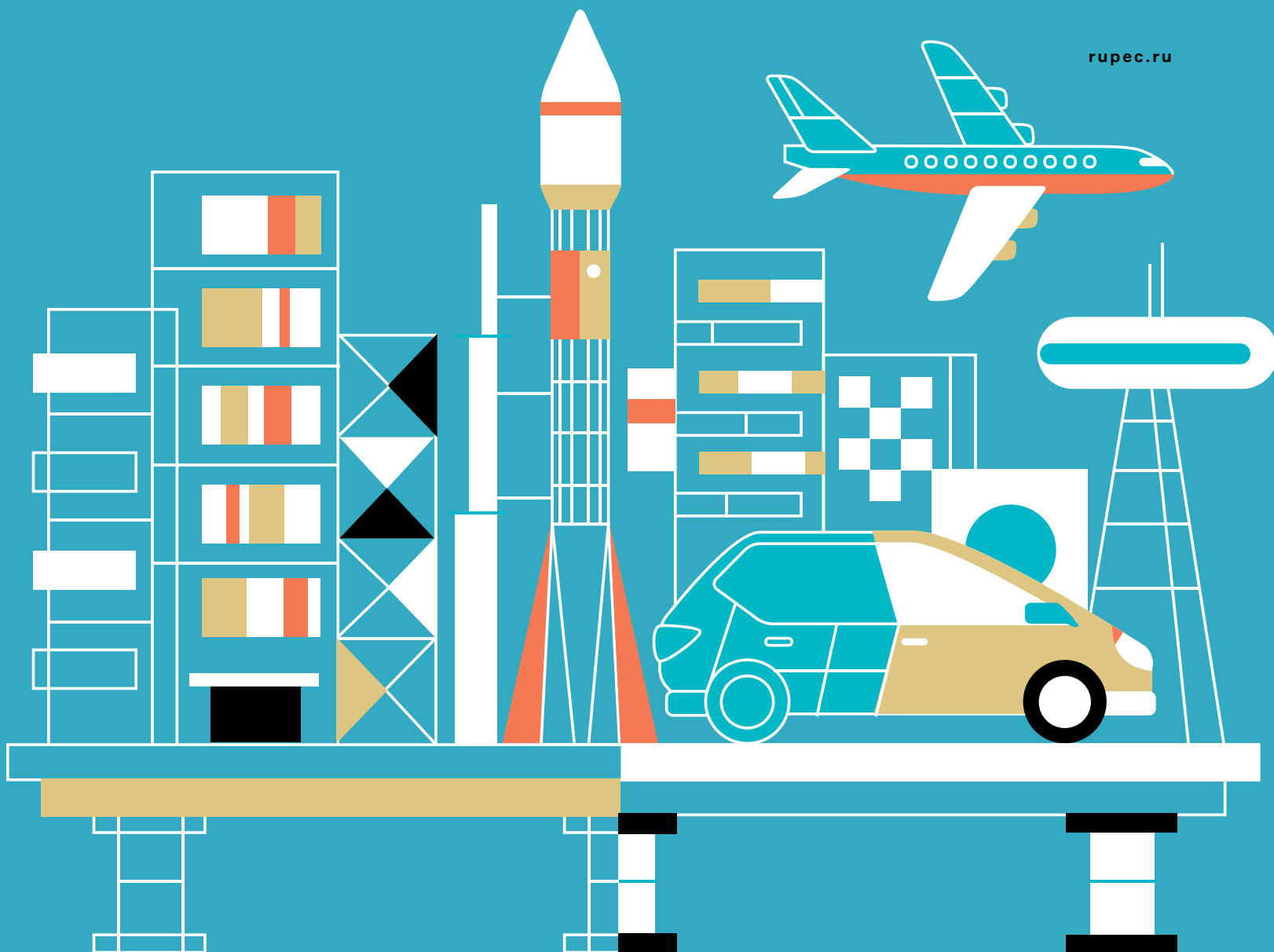


# СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР: ЗАКОНЧИЛАСЬ ЛИ ПОЛИМЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ?





# **СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР: ЗАКОНЧИЛАСЬ ЛИ ПОЛИМЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ?**



<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>Основные выводы</b>	<b>5</b>
<b>Полимеры vs традиционные материалы: неустранимые различия</b>	<b>7</b>
<b>Автомобильная промышленность</b>	<b>12</b>
<b>Проблемы полимерных композитов в автопроме</b>	<b>17</b>
<b>Полимерный двигатель?</b>	<b>20</b>
<b>Авиационная промышленность</b>	<b>23</b>
<b>Строительство</b>	<b>27</b>
<b>Арматурные стержни из композитов</b>	<b>28</b>
<b>Ремонт и модификация несущих конструкций</b>	<b>29</b>
<b>Строительство и ремонт мостов</b>	<b>30</b>
<b>Строительство зданий</b>	<b>31</b>
<b>Заключение</b>	<b>32</b>

## Введение

Очень часто в дискуссиях вокруг нефтехимии и ее роли в современной структуре производства и потребления приводится тот факт, что за последние 70 лет спрос на полимеры (основные продукты отрасли) увеличился в 200 раз и даже несколько больше (в 1950 году потребление оценивалось всего в 1,5 млн тонн). При этом спрос на «традиционные» материалы, такие как сталь или дерево, вырос лишь в 2–8 раз. Такую диспропорцию объяснить достаточно просто: ключевым (впрочем, не единственным) фактором здесь явился процесс замещения традиционных материалов полимерами в тех сферах, где это было технологически возможно и экономически обоснованно. И хотя явно это обычно не звучит, подавляющее большинство людей в полимерном бизнесе убеждено, что этот процесс будет продолжаться и впредь. Иными словами, потенциал развития емкости полимерных рынков фундаментально превышает потенциал всеобщего экономического и демографического роста.

При внимательном же взгляде на этот тезис оказывается, что он не столь очевиден. Действительно ли в нашу высокотехнологичную (и высокоэффективную в издержках) эпоху потенциал этого замещения, когда полимеры вытесняют металлы, сплавы, стекло и керамику из их традиционных сфер применения, еще сохранился? Если это так, то где он сосредоточен? На что обратить внимание полимерному бизнесу?

Если уточнить проблематику, то корректнее, вероятно, поставить вопросы так: какое место сегодняшние технологические тенденции в сфере дизайна, проектирования, конструирования и внедрения новых товаров (или поколений товаров) отводят полимерным материалам в будущем? Расширяют ли сегодняшние полимеры свою структурную экспансию? И если да, то какими будут или, как минимум, должны быть эти полимерные материалы?

Стоит отметить, что вопрос этот, насколько мы можем судить, не исследовался публично, по меньшей мере, в российском отраслевом сообществе. В настоящем обзоре RUPEC, разумеется, не претендует на полное и исчерпывающее устранение этого пробела. Для этого потребовались бы достаточно специфические инженерные и материаловедческие знания, которые лежат далеко за сферой наших интересов. Здесь мы скорее обозначим ключевые конструкторские тенденции и ограничения на пути расширения потребления полимерных материалов в наиболее технологичных и «продвинутых» сферах, отметив те основные области, которые потребуют от полимерного бизнеса более внимательной оценки.

## Основные выводы

- Структурный фактор (замещение «традиционных» материалов в их привычных сегментах применения) в период полимерного бума был одной из главных причин опережающих темпов роста спроса на пластики в последние 70 лет.
- Однако сегодня многие признаки указывают на исчерпание роли структурного фактора в качестве драйвера спроса на полимеры: это и сближение темпов роста на пластики и мирового ВВП, и интенсивное усложнение полимерных материалов, что указывает на то, что полимерам приходится конкурировать с традиционными материалами во все более и более сложных применениях.
- Вес — одно из ключевых преимуществ полимеров и композитов. Именно он наиболее востребован в таких передовых с точки зрения разработок и внедрений новых материалов отраслях, как автопром, авиационная промышленность и строительство.
- Изменение структуры применяемых материалов в автопроме в последние годы было очень драматичным, однако в основном оно состоялось за счет расширения роли высокопрочных сталей и алюминия. Потенциал применения полимеров существенно ограничен механическими и температурными требованиями к материалам.
- При этом в существующих концепциях и проектировках наибольший выигрыш в весе может быть достигнут за счет максимизации использования полимерных композитов на основе углеволокна. Впрочем, пока существующие технологии проектирования, производства и обслуживания углепластиков ограничивают их применение из-за очень высокой цены внедрений, которая не окупается топливной экономией.
- Важно, что все изыскания в области расширения использования полимеров в автопроме сегодня сосредоточены вокруг композитов на основе полиэфирных и эпоксидных смол, а также высокотемпературных пластиков. Потенциал расширения применения базовых пластиков в глобальном смысле, по-видимому, исчерпан (хотя сохраняется для отдельных моделей).
- Тенденции в авиационной промышленности схожи: первую роль играют углепластики с высокотемпературными связующими (полиимидные смолы и т. п.), поскольку вслед за силовыми элементами планера стоит задача снижения веса элементов конструкции двигателей.
- Структурный фактор в строительном сегменте выражен еще в меньшей степени из-за дешевизны традиционных материалов (сталь и бетон) и отработанности проектных и строительных решений под них. Полимеры и композиты находят ограниченные применения либо для ремонта конструкций, либо для уникальных в своем роде проектов, где вес и удобство монтажа конструкций заставляют делать выбор в пользу композитов или высокотехнологичных термопластов несмотря на существенный рост стоимости.

- Таким образом, сегодня акцент расширения ниш для полимеров в исследованных отраслях приходится на реактопласты и high performance полимеры. Рыночная статистика подтверждает это: спрос на инженерные пластики и композиты в последние 15 лет растет быстрее спроса на полимеры вообще. Учитывая, однако, что доля реактопластов, инженерных и высокотехнологичных термопластов исключительно мала в общем объеме потребляемых миром полимеров, вероятнее всего, можно говорить, что «структурный» фактор если и не сошел на нет, то весьма к этому близок.



# ПОЛИМЕРЫ VS ТРАДИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: НЕУСТРАНИМЫЕ РАЗЛИЧИЯ

Прежде всего стоит поговорить о том, в какой мере вообще можно рассчитывать, что полимеры могут заменять традиционные материалы (в первую очередь металлы и сплавы, а также стекло). Ведь между этими материалами есть значимые различия, часто совершенно неустранимые просто по природе самих веществ.

Попробуем переместиться на достаточно высокий уровень абстракции и предположить, что существует всего несколько базовых характеристик того или иного товара, изделия или детали в ходе их эксплуатации, которые могут проявляться индивидуально или же комбинироваться:

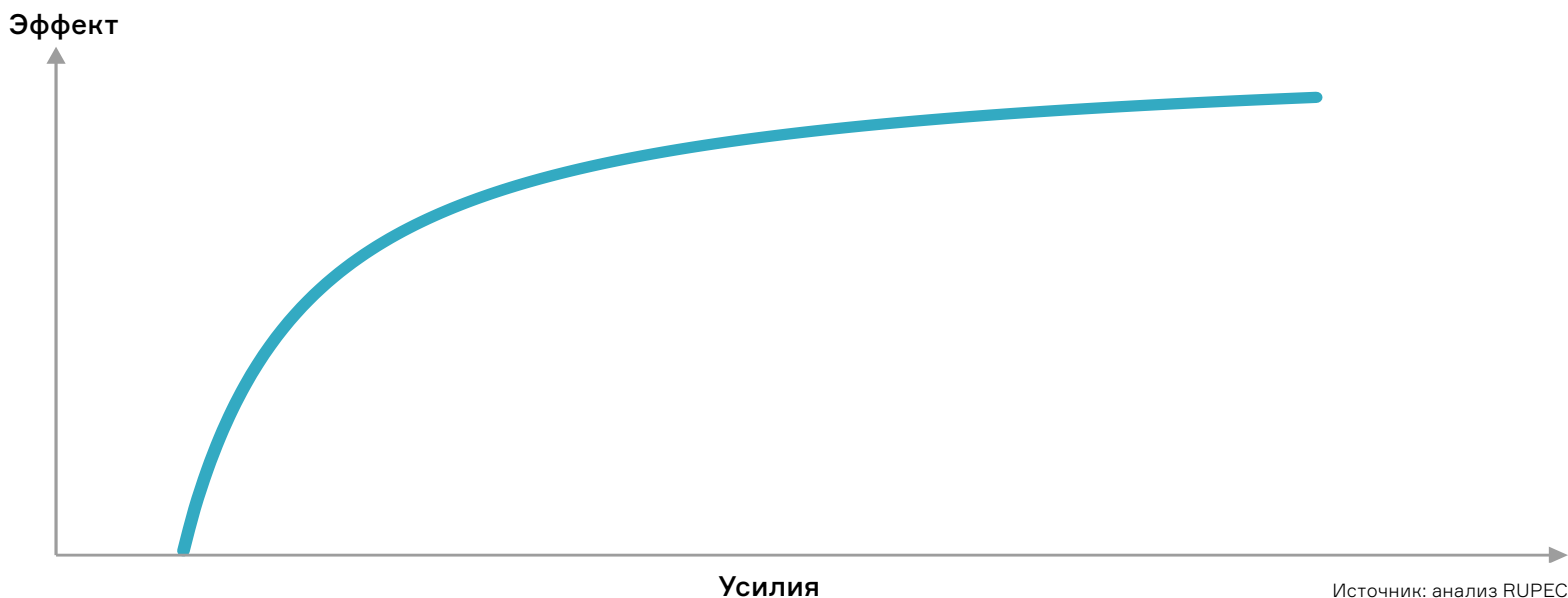
1. Способность сопротивляться (в различных смыслах) механическим нагрузкам.
2. Способность сопротивляться температурным воздействиям.
3. Масса на единицу объема (плотность).
4. Различные формы взаимодействия с излучением, например, способность пропускать свет в видимом диапазоне (прозрачность).
5. Характеристика по отношению к проводимости тока (материалы-проводники, материалы-изоляторы и полупроводники).
6. Характеристики по отношению к агрессивным химическим средам.
7. Барьерные свойства по отношению к газам.
8. Стоимость.

Например, к пищевым упаковочным пленкам и внутренним слоям автомобильных покрышек предъявляются схожие требования в смысле газопроницаемости, однако совершенно различные с точки зрения механики. Лабораторная колба и солнечные очки в обоих случаях должны быть прозрачны, однако колба к тому же должна выдерживать немаленькие температурные стрессы. Но очки, в отличие от колбы, должны фильтровать ближний УФ-диапазон. Механические требования к столу в летнем кафе исчерпываются единственным пожеланием, чтобы такой стол не разрушался под собственным (плюс-минус) весом, чего не скажешь о зубчатых колесах главной пары в мостовом редукторе грузовика. Стол при этом должен быть дешевым, а главная пара — совсем не обязательно. Примеров можно приводить множество. Ключевая идея заключается в следующем: когда мы говорим о выборе тех или иных материалов в процессе дизайна или проектирования, речь всегда идет о некотором пересечении множеств, вытекающих из требований к нашему изделию. Фактически это поиск оптимума в многомерном пространстве характеристик.

Отсюда сразу вытекает вполне логичное следствие: там, где измерений этого пространства немного, найти такой оптимум проще. Как в примере с пластиковым столом: требования к нему минимальны, поэтому выбор в пользу какого-нибудь дешевого термопласта достаточно естественен. Таким образом, если вновь вернуться к интересующему нас процессу замещения традиционных материалов полимерными вообще, то можно без особых сомнений выдвигать следующую гипотезу: за годы, прошедшие с начала полимерной революции (1950-е), большая часть потенциала замещения традиционных материалов на полимерные уже реализована.

Эту же мысль можно также выразить в форме достаточно распространенной в общей экономике степенной функции, известной, как кривая Парето. Классическая словесная формулировка этого закона звучит так: «20% усилий дают 80% результата, а остальные 80% усилий — лишь 20% результата» (см. Рис. 1).

## Рисунок 1. Кривая Парето



Интересующий нас основной вопрос, следовательно, заключается в том, где на этой кривой в настоящий момент находится рынок.

По всей видимости, мы все же уже прошли перегиб этой кривой. Иными словами, эффективность замещения прирастает медленнее, чем затрачиваемые усилия. На это указывает множество косвенных признаков. Во-первых, темпы роста глобального спроса на полимеры все более сближаются с темпами общего экономического роста. Это означает, что условный «структурный» фактор все более утрачивает свое значение по сравнению просто с фактором валового роста. Особенно этот тезис нагляден в свете того, что глобальный демографический рост медленнее роста экономического.

Во-вторых, сложность полимерных материалов возрастает. Это, например, указывает — используя введенные выше абстракции — на то, что размерность пространства характеристик, в котором дизайнерам и конструкторам приходится искать оптимум, увеличивается. Говоря проще, полимеры стремятся заместить традиционные материалы во все более и более высокотехнологичных приложениях.

Таким образом, один из ключевых аспектов этого замещения сегодня — это способность полимеров и полимерных материалов (в том числе композиционных) проникать своими характеристиками в те области, которые ранее были им недоступны. Наиболее значимыми из таких областей, по-видимому, являются механические и температурные свойства, вес и стоимость.

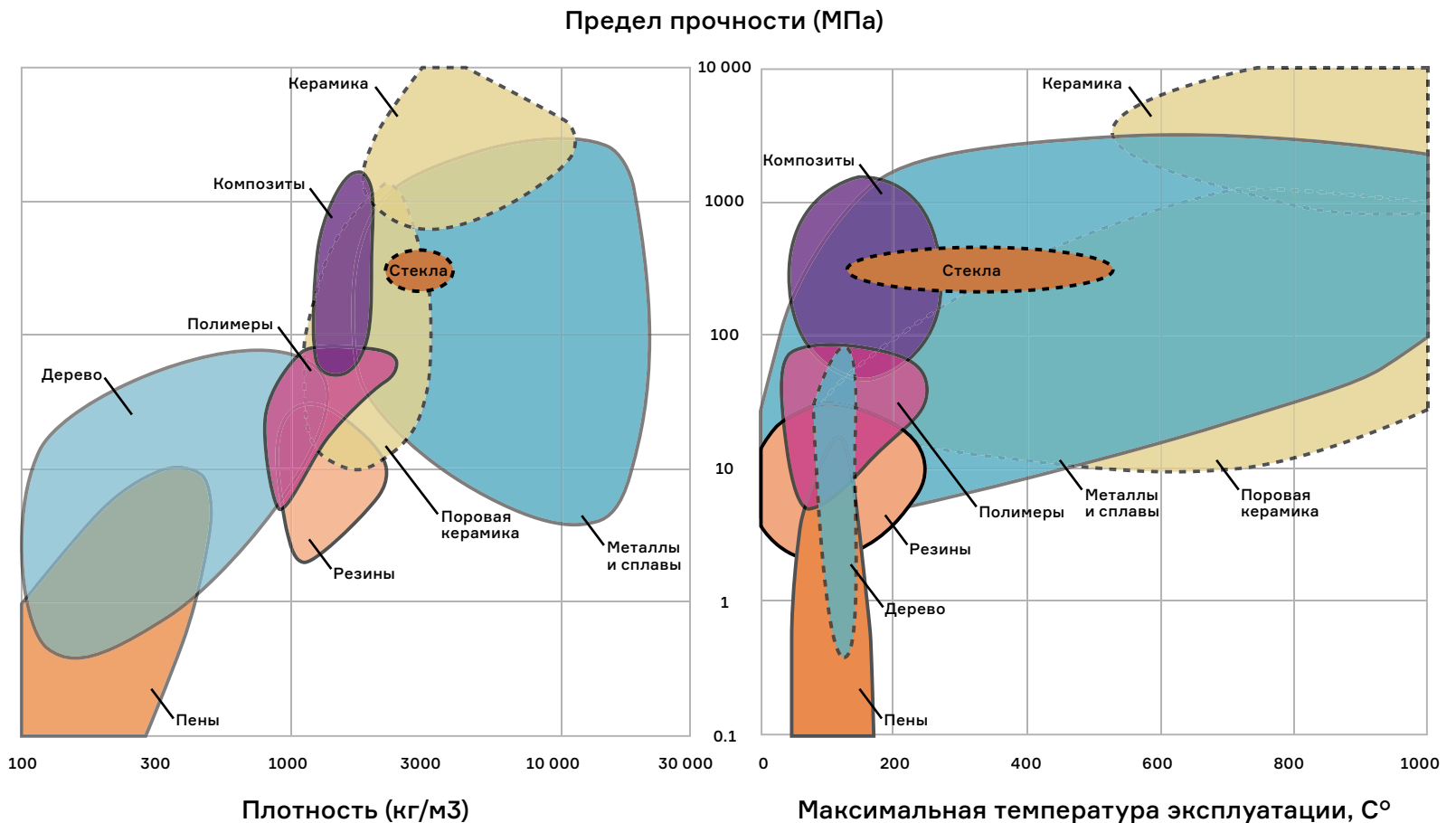
Вес является одним из ключевых преимуществ полимерных материалов. Значимость этого фактора для разных применений и отраслей различна. Агрегированные оценки предложены, например, VCG. Так, в станкостроении экономия веса несет минимальную ценность (менее \$10 за кг), а вот в гонках «Формулы-1» она превышает \$120 000 (см. Рис. 2).

## Рисунок 2. Ценность экономии веса в разных отраслях

Отрасль	Ценность экономии веса, \$/кг
Болиды «Формулы 1»	>120 000
Космические корабли	25 000
Самолеты	1 200–13 000
Автомобили	20–600
Грузовики и спецтехника	1,3–12,7
Станки	0–6

Источник: BCG

## Рисунок 3. Пределы прочности, удельный вес и температуры эксплуатации различных материалов



Впрочем, с других точек зрения полимеры и полимерные материалы в широком смысле не могут полноценно конкурировать, например, с металлами и сплавами. Лишь немногие полимерные композиты показывают одновременно меньшую плотность и более высокий предел прочности, чем некоторые металлы и сплавы. В смысле же характерных температур эксплуатации при сопоставимых пределах прочности позиции полимеров и композитов еще слабее (см. Рис. 3).

Стоит обратить внимание, какой значительный рывок дало появление и внедрение полимерных композитов. Они позволили значительно расширить механические и температурные диапазоны использования полимерных материалов почти без увеличения плотности. Например, 30%-е армирование стекловолокном полиамида-6,6 дает более чем двукратный выигрыш в пределе прочности и трехкратный — в модуле упругости при росте плотности всего в 1,3 раза (по данным ассоциации Molded Fiber Glass Companies).

Расширение температурных границ использования композитов — одна из ключевых тем научных и прикладных исследований последних лет. Новые композиционные материалы, например, на базе полиимидных смол, уже уверенно штурмуют отметку температуры эксплуатации в 400°C. Так, у полиимидной смолы 900HT температура стеклования составляет 458°C (по данным TenCate Advanced Composites для препрега TenCate TC890). Новейшие композиты такого рода по пределу прочности уже превосходят сталь, а по модулю упругости стоят на уровне алюминия. Недостатки вполне понятны: высокая цена, очень высокая сложность монтажа (бэзгинг под полиимидными же пленками) и автоклавный процесс отверждения при высокой температуре.

Далее мы рассмотрим несколько отраслей, наиболее восприимчивых к возможностям замещения «традиционных» — более тяжелых — материалов на полимерные. Это автопром, авиационная промышленность и строительство.

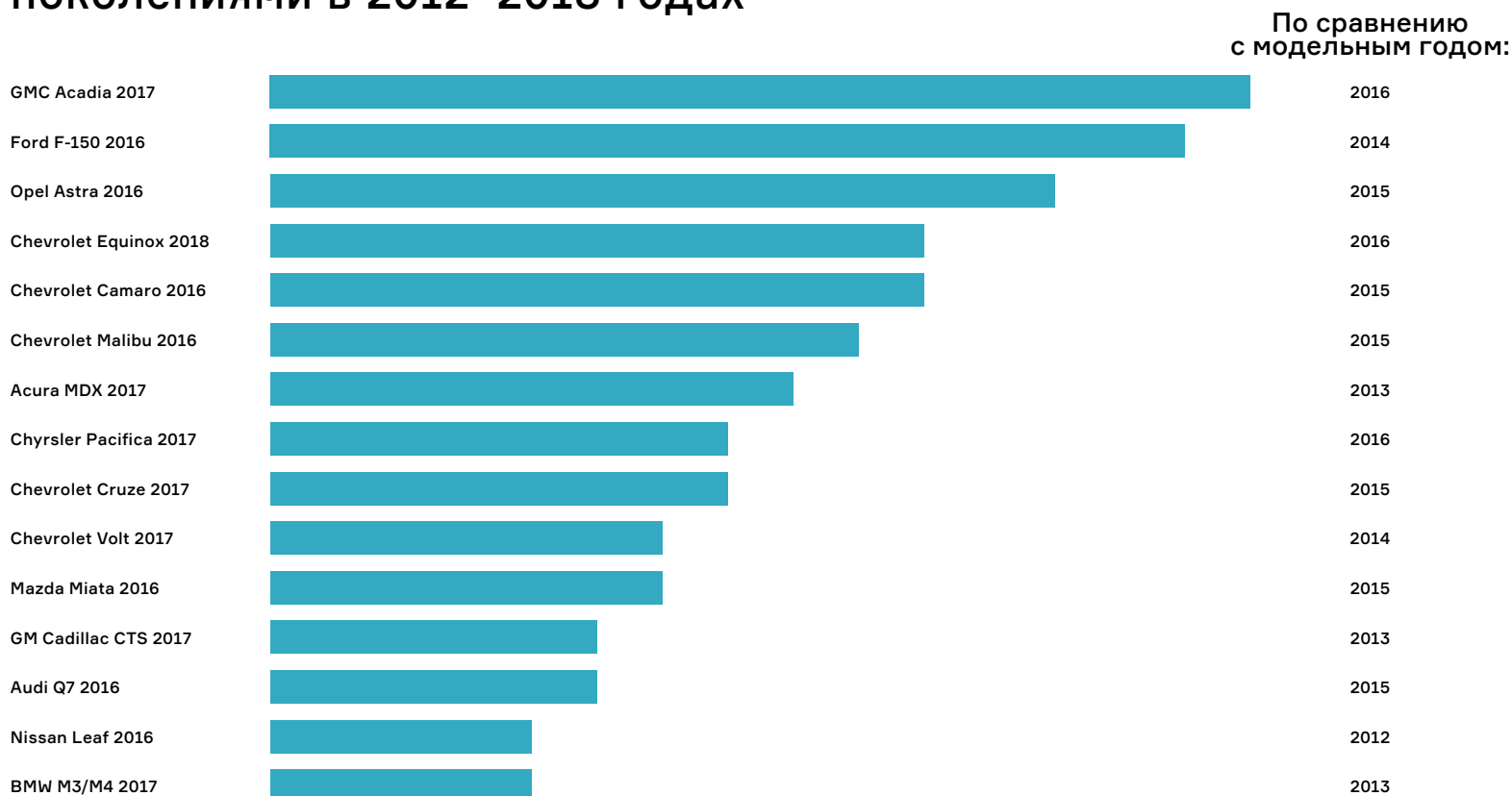
# АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Основным драйвером, стимулирующим разработку и внедрение новых материалов и технических решений при проектировании автомобилей, является стремление снизить их вес. Этот тренд, зародившийся во времена первого нефтяного кризиса 1973 года (который спровоцировал сильный рост цен на топливо в развитых странах), связан со стремлением повысить топливную эффективность автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Иными словами, снижая массу автомобиля, разработчики пытаются добиться роста пробега на единицу потребленного топлива. По оценкам Национальной академии наук США, каждые 5% снижения веса транспортного средства ведут к выигрышу в пробеге в 3–4%.

В последние годы этот тренд, который, казалось бы, должен был угаснуть после обвального падения цен на нефть в 2014 году, оказался поддержан развитием индустрии электромобилей. Здесь величина пробега на одной зарядке лимитируется доступными (и экономически оправданными) технологиями в области хранения заряда. Эти ограничения преодолеваются медленно в том числе из проблемы доступности сырья. В этом смысле снижение веса электромобилей — очень эффективный (в смысле отдачи на затраченные усилия) способ увеличить длину такого пробега.

Изменения происходят прямо на наших глазах, и они весьма существенны. Только в последние годы прогресс в области снижения веса одних и тех же моделей легковых пассажирских автомобилей от поколения к поколению составляет от 4 до 15% (см. Рис. 4).

## Рисунок 4. Снижение веса легковых автомобилей между поколениями в 2012–2018 годах



Источник: ICCT

Может показаться, что столь впечатляющие темпы прогресса в области снижения веса автомобилей свидетельствуют о наличии обширного и еще не до конца реализованного потенциала в том числе и в интересующем нас вопросе внедрения полимерных материалов.

Однако не все так просто. Давайте посмотрим, какие системы и подсистемы автомобиля вносят наибольший вклад в кумулятивный вес. В качестве примера мы взяли достаточно типичную для С-класса модель Ford Fusion 2013 модельного года общей массой 1502 кг (см. Рис. 5). Надо сказать, что для очень многих современных легковых автомобилей даже разных классов (вплоть до SUV) представленная пропорция воспроизводится с удивительным постоянством.

## Рисунок 5. Структура массы Ford Fusion 2013 модельного года

Система	Доля в общей массе	в том числе подсистемы:	Доля в массе системы	Доля в общей массе
Система силового блока	30,2%	Двигатель	34,8%	10,5%
		Коробка передач	19,5%	5,9%
		Топливная система	16,6%	5,0%
		Выхлопная система	5,0%	1,5%
		Прочие подсистемы	24,2%	7,3%
Система кузова	30,4%	Кузовной каркас	71,4%	21,7%
		Накладные элементы кузова	13,5%	4,1%
		Остекление	8,2%	2,5%
		Бамперы	2,0%	0,6%
		Прочие подсистемы	4,9%	1,5%
Система шасси	20,1%	Подвеска	40,8%	8,2%
		Тормозная система	24,4%	4,9%
		Колеса и шины	27,4%	5,5%
		Рулевое управление	7,5%	1,5%
Система интерьера	14,3%	Сиденья и блок ремней безопасности	36,4%	5,2%
		Отделка салона и изоляция	25,2%	3,6%
		Модуль приборной панели	17,5%	2,5%
		Прочие подсистемы	21,0%	3,0%
Прочие системы	5,0%			

Источник: INL, анализ RUPEC

Как можно видеть, наиболее очевидный кандидат на замещение неких традиционных материалов на полимерные — система интерьера — и без того уже занимает в общей массе автомобиля достаточно скромные 14,3%, треть из которых приходится на в какой-то мере силовой элемент — кресла. Таким образом, потенциал снижения веса за счет применения полимерных решений тут, видимо, практически исчерпан, если не идти, конечно, на упрощение дизайнерских



решений и редукцию функционала. И, вероятно, именно применению в интерьерных решениях обязано лидерство полипропилена среди всех прочих полимеров в автопроме: это самый легкий (в смысле плотности) термопласт с удовлетворительными механическими характеристиками (подробнее об этом смотрите, например, наше исследование «Автомобилестроение как драйвер спроса на полимерную продукцию», октябрь 2014 года).

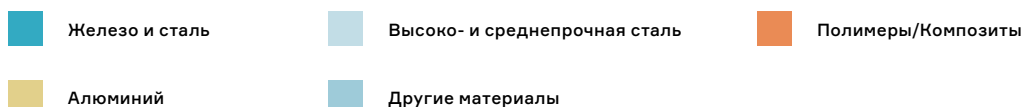
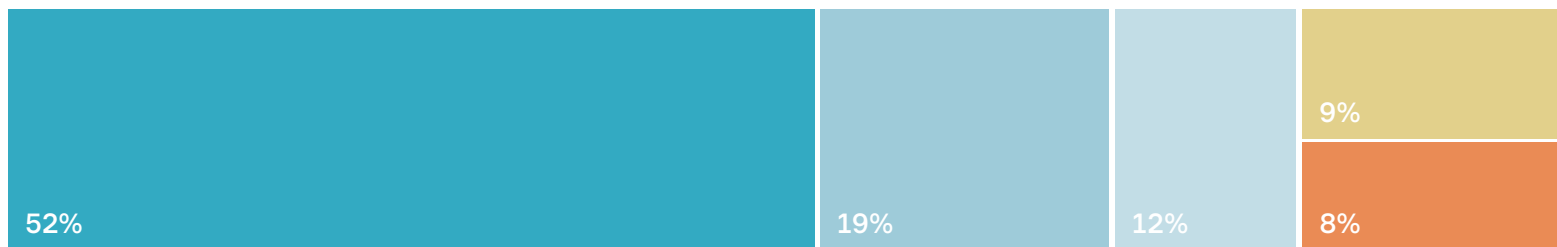
Основная же масса автомобиля все-таки приходится на те системы, где на первый план выходит не форма (как в случае с интерьером), а механика конструкций, а в случае с подсистемами силового блока еще и температурная устойчивость: системы 60% массы современного автомобиля — это силовая установка с обеспечивающими подсистемами и кузов. Именно на редукцию массы этих систем за счет внедрения новых материалов и направлены основные усилия разработчиков как в прошлом, так и сейчас. Этот тезис можно в какой-то мере проиллюстрировать динамикой изменений долей различных материалов в кумулятивном весе автомобиля за последние 25 лет (см. Рис. 6). Видно, что наиболее заметные изменения имели место в роли средне- и высокопрочных сталей, обеспечивающих, в отличие от традиционной стали, сопоставимые механические показатели деталей при меньшем расходе материала, то есть при меньшей их массе.

## Рисунок 6. Изменение структуры массы типового автомобиля по видам материалов

1977



2004



Ключевой вопрос: сохранится ли именно этот тренд на эволюцию металлов как материалов для силовых элементов автомобиля, или же полимеры смогут потеснить их и в этой части?

Надо сказать, что тема подобных альтернатив является очень хорошо изученной в мировой автоиндустрии. Вовлеченные в эти исследования компании (а это не только автопроизводители, но и некоммерческие организации и консалтинговые фирмы, получающие финансирование в том числе от государственных институтов) имеют на руках не только общетеоретические выкладки, но и полноразмерные и полнофункциональные образцы, созданные для тестирования различных опций в смысле применяемых материалов и их комбинаций.

Характерно, что прототип, отражающий вариант наиболее агрессивной редукции массы (обычно это какой-то типичный существующий пассажирский седан среднего ценового сегмента) на 45% относительно базовой линии, реализует максимизацию вовлечения именно полимеров в построение в том числе силового каркаса и части силовых подсистем. Речь идет о масштабном применении полимерных композитов (главным образом углепластиковых, но также и стеклопластиковых и сплавов на основе магния и алюминия, в том числе относительно нового материала — экструдированного алюминия (см. Рис. 7).

## Рисунок 7. Снижение компонентов массы автомобиля через максимизацию использования углепластиков



Казалось бы, решение найдено. Проблема, однако, заключается в том, что при тестировании различных концепций снижения массы разработчики задаются различными экономическими ориентирами, лимитирующими полет технологической фантазии. В их основе лежит, как правило, приведенное выше соотношение между снижением массы автомобиля и соответствующим снижением расхода топлива. Исходя из этих соображений (а также цен на топливо) можно вывести некую ориентировочную предельную стоимость 1 кг веса, от которого удалось избавиться. Скажем, распространенный в США ориентир \$3,42/фунт означает, что удорожание автомобиля (если точнее, то рост прямых производственных затрат производителей), вызванное применением новых технологий и материалов, не должно превышать \$3,42 на один фунт сэкономленной массы (\$7,5/кг). Из этих соображений, глядя на Рис. 7, можно сказать, что радикальное снижение массы с 1556 до 822 кг должно достигаться путем удорожания автомобиля не более, чем на \$5505. Если это удорожание будет больше, то нет никакого смысла в редукации массы: рост топливной эффективности не окупит рост стоимости.

С этих позиций «карбоновая концепция» пока оказывается абсолютно несостоятельной: масса в 822 кг достигается ценой увеличения затрат производителя с \$15724 до \$25211 (расчёты INL), то есть на \$9478 или \$12,9/кг, что в полтора раза выше ориентира. Проще говоря, карбоновый вариант оказывается слишком дорогим. Существенно более реалистичными выглядят сценарии, базирующиеся на внедрении новых/альтернативных металлов и сплавов, в первую очередь за счет перехода к сборным (в том числе бессварочным) конструкциям силового каркаса кузова. Это, например, расширение использования высокопрочных сталей вместе с алюминиевыми элементами, полученными высокоточным литьем под давлением и экструзией, а также менее нагруженными деталями из магниевых сплавов и (тем не менее) композитными листовыми фрагментами. Физически такой подход воплощают известные в индустрии прототипы консорциума Ford/Vehma под именами Mach I и Mach II (см. Рис. 8).

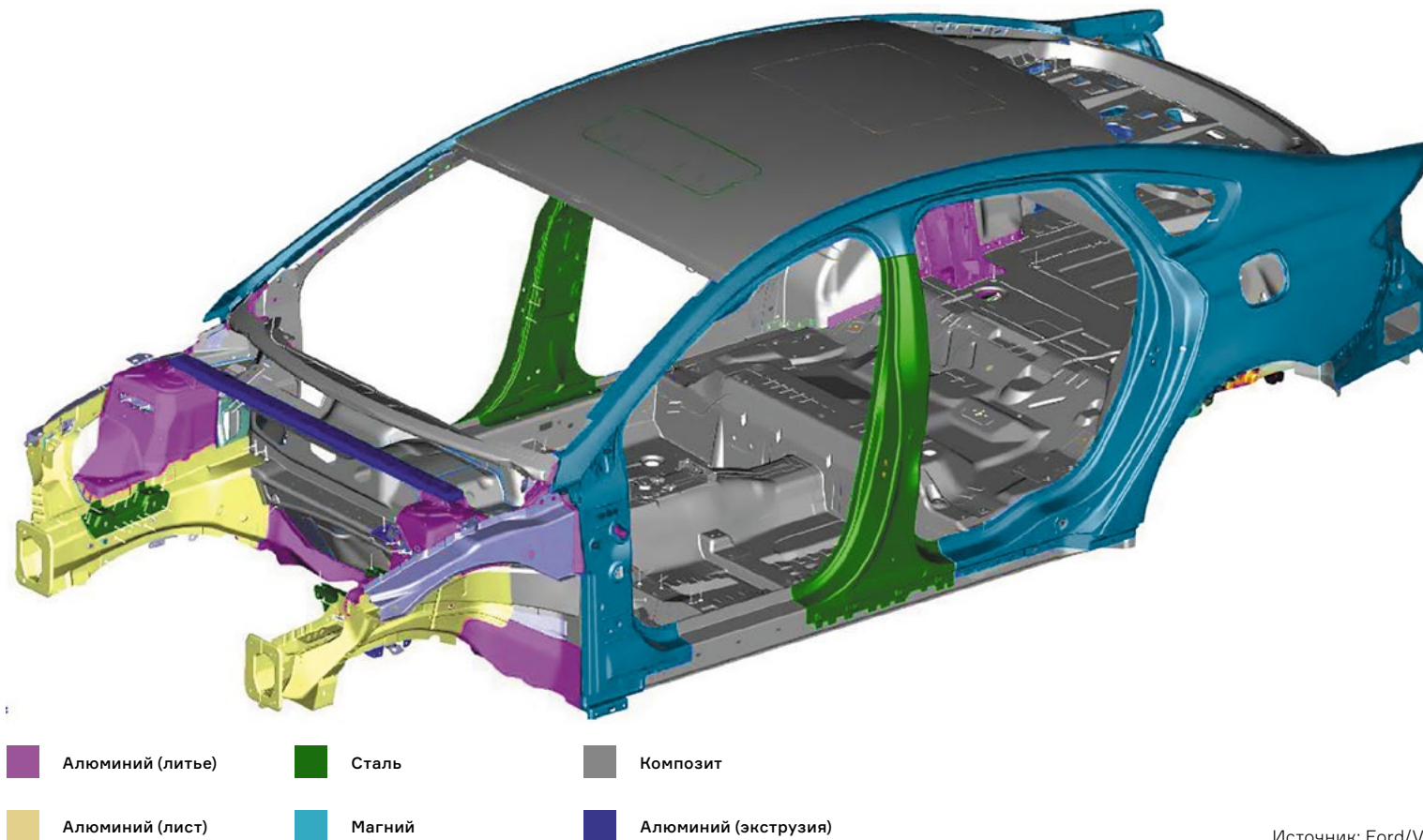
Проблемы, стоящие на пути масштабирования применения полимерных композитов вообще и углепластиков в частности в автомобилях массового производства, являются хорошо идентифицированными.

### **ПРОБЛЕМЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В АВТОПРОМЕ**

Если выносить из обсуждения саму по себе стоимость связующих для подавляющего большинства композитов (эпоксидные смолы, полиэфирные смолы, полиамиды, полипропилен и т. п.), у углепластиков и композитов вообще есть ряд характерных проблем.

1. Основным способом производства углеволокна является сжигание волокон из полиакрилонитрила (ПАН). Соответствующий ПАН-прекурсор дорог из-за специфичности технологии его производства. Кроме того, имеющиеся технологии пока плохо адаптированы под нужды автопрома (на который приходится около 15–20% спроса на углеволокно). Во-первых, технологии

## Рисунок 8. Устройство неокрашенного кузова концепта Mach II



Источник: Ford/Vehma

- сжигания прекурсоров энергоемки, медленны и низкопроизводительны, чтобы обеспечить массовое производство и добиться за счет эффекта масштаба снижения себестоимости. Во-вторых, точное управление качеством готового углеволокна через контроль условий получения прекурсора доступно далеко не всем производителям в мире. В то же время для массирования применения углепластиков стабильность качества волокна и точность управления им должна быть безусловна.
2. Совместимость волокон (угле-, стекло-, полиамидных и т. п.) и связующих (реактопластов, термопластов) не универсальна. Это во многом ограничивает возможности переработчиков и сужает потенциал инвестиций в новые линии (упрощая, переработчик вынужден ориентироваться на доступность и цену конкретных марок волокон и связующих, гарантирующих в паре целевые свойства изделий или препрегов). Кроме того, ограничена совместимость различных препрегов между собой, не являются оптимальными технологии склейки и поверхностной обработки. Например, композиты или препреги, обеспечивающие нужное сочетание мехсвойств и веса, могут иметь затруднения при окраске.

3. Сами по себе существующие технологии производства деталей из полимерных композитов, в том числе путем отверждения препрегов (или пакетов препрегов) или SMC (композитные прессоматериалы, чаще всего на основе стекловолокна и полиэфирных смол), являются достаточно медленными и низкопроизводительными в пересчете на одну линию. Таким образом масштабирование производства пока возможно лишь путем увеличения числа параллельных линий, что означает практически линейный же рост инвестиций, то есть эффект масштаба не реализуется. Все это делает полимерные композиты дорогами только лишь в смысле перенесенных в цену инвестиций, не говоря уже об операционных затратах (волокно, связующие, электроэнергия и труд).
4. Технологии соединения готовых деталей из композитов друг с другом, и в особенности с другими материалами, либо несовершенны в принципе в смысле механических качеств стыков, либо не обеспечивают высокую скорость монтажа, необходимую для поточного производства в автоиндустрии.
5. Поскольку в целом отсутствуют качественные и надежные инструменты для прогнозирования механических свойств и эксплуатационного поведения композитных деталей в условиях механических и температурных стрессов, а также усталости, то проектировщики вынуждены работать практически вслепую. Это ведет к избыточным издержкам при проектировании (в том числе при создании и изучении поведения на прототипах). Вторая составляющая этой проблемы: опасение, что механические свойства деталей переоценены, иногда заставляет проектировщиков использовать избыточные объемы материалов (грубо говоря, листы толще, чем могли бы быть, потому что механика системы с трудом поддается моделированию). Это также сказывается на стоимости деталей: они дороже, чем могли бы быть.
6. Наконец, технологии поиска дефектов и диагностики состояния деталей из композитов являются совершенно незрелыми, что опять-таки сдерживает их внедрение в ответственные и механически нагруженные системы и узлы автомобилей.

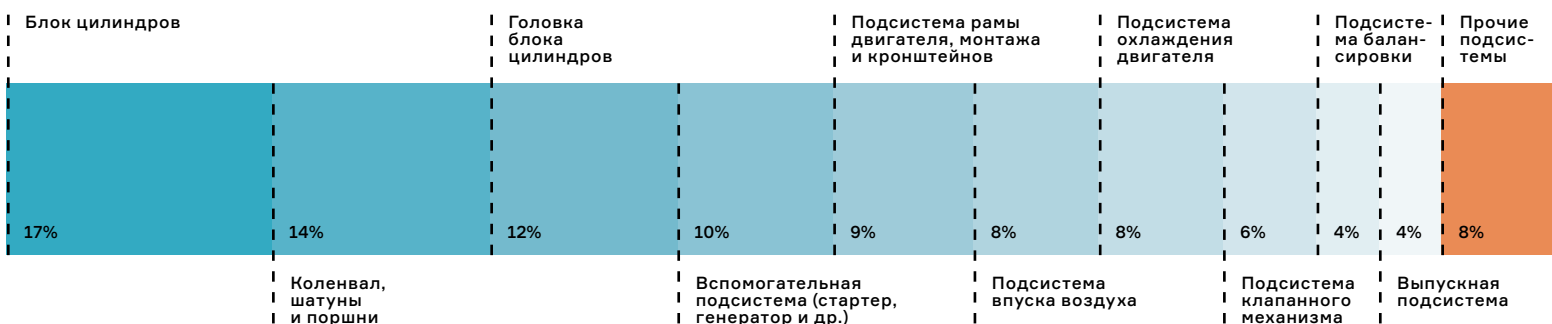
Все эти особенности современной индустрии композитных материалов пока делают их с учетом всего цикла (волокно, связующие, препреги и детали, обработка, сборка, финишная обработка, диагностика, восстановление и ремонт) слишком дорогими для массированного внедрения в серийное производство легковых автомобилей. Например, для углепластиковых деталей отраслевые аналитики приводят следующие цифры: чтобы агрессивные сценарии редукции массы через карбоновые детали попадали в целевой диапазон удорожания автомобиля, стоимость производства 1 кг готовых углепластиковых деталей должна снизиться с текущих \$100 почти в 10 раз, а стоимость углеволокон подходящего качества — с текущих \$25 до \$8–12 за кг. Очевидно, что достижение этих целей лежит большей частью в области дальнейших разработок и исследований, в частности в сфере технологий переработки/производства композитных деталей и их проектирования.

Стоит также отметить тот факт, что в сегменте коммерческого автотранспорта перспективы композитных материалов выглядят более масштабными, так как типовые пробеги грузовых автомобилей существенно выше, чем легковых автомобилей частного использования. Это означает, что лимитирующий ориентир удорожания на единицу сэкономленного веса для них лежит значительно выше. В подтверждение этого тезиса можно привести данные группы «КАМАЗ»: в 2018 году 23% из 220 кг полимерных деталей приходилось на стеклопластиковые композиты и SMC.

### ПОЛИМЕРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ?

Масса двигателей внутреннего сгорания серьезно беспокоит автопроизводителей. Пока наиболее важным подходом к ее сокращению являются пересмотр динамических параметров установок. Иными словами, конструкторы пытаются снять все более высокую мощность со все меньшего объема двигателя. В смысле массы это приносит значимые дивиденды. Если посмотреть на структуру массы двигателя (здесь для примера мы взяли данные модели Toyota Venza 2012), то окажется, что половина приходится на элементы, связанные с линейными габаритами: блок цилиндров, головку блока, поршни, шатуны и коленвал (см. Рис. 9).

**Рисунок 9. Структура массы двигателя Toyota Venza 2012 модельного года**



Источник: INL, анализ RUPEC

Сокращение объема двигателя позволяет уменьшить (правда, нелинейно) и геометрический габарит этих деталей, выиграв в массе. Постепенный переход на алюминиевые блоки цилиндров и ГБЦ также позволил существенно снизить массу ДВС. Однако, конечно, радикального прогресса пока не случилось, в первую очередь из-за высокой температурной и механической напряженности деталей системы. В этом смысле концепции «полимерных» двигателей представляют большой интерес, демонстрируя потенциал современных материалов в смысле редукции массы системы.

Такие попытки начались еще в 1969 году, когда американский инженер Мэттью Хольцберг впервые попробовал сделать поршни из пластика, однако головка поршня не выдержала температурных нагрузок. Тогда он стал создавать поршни из пластика с алюминиевыми головками. В 1979 году Хольцберг создал первый вариант двигателя, который весил всего 69 кг вместо 188 кг своего чугунного аналога. Металлическими в нем были гильзы цилиндров, верхняя часть камеры сгорания, головки поршней, подшипники, клапаны и коленчатый вал исходного 2,3-литрового двигателя Ford Pinto. Остальные детали, включая блок, рычаги и юбки поршней, были сделаны из армированных стекловолокном полиамидимидных смол, изготовленных Amoco Chemicals Company.

Вторая версия двигателя весила 76 кг, что вдвое меньше его серийного предшественника. Пластиковые детали включали в себя блок цилиндров, крышку распределительного вала, воздухозаборные трубы, впускные клапаны, поршневые юбки и поршневые пальцы, шатуны, маслоъемные поршневые кольца, толкатели, держатели клапанной пружины и шестерни распределительного вала. Двигатель был установлен на шасси и в течение двух сезонов в 1984–1985 годах участвовал в гоночных соревнованиях.

В 2011 году Хольцберг (в лице Composite Castings LLC) и Toho Tenax объявили о создании двигателя, блок которого был получен по технологии литья под давлением смеси эпоксидной смолы и рубленого (6 мм) углеволокна. Пресс-форма перед заливкой заполнялась также необходимыми металлическими (алюминиевыми) внутренними деталями.

В 2015 году Институт химической технологии Фраунгофера (Fraunhofer ICT) и Sumitomo Bakelite Company представили разработку одноцилиндрового исследовательского двигателя с корпусом из фенольной смолы, армированной стекловолокном (55% стекловолокна и 45% смолы). Двигатель весил примерно на 20% меньше, чем эквивалентный алюминиевый. Его конструкция использовала металлические вставки в местах с высокой тепловой и механической нагрузкой, например, из сплава (или из алюминия и т. д.) была сделана гильза цилиндра.

Также в 2015 году Solvay объявила еще об одном проекте создания автомобильного двигателя из полимерных материалов. Компания проявила интерес к старой концепции Хольцберга 1980-х годов. Проект получил название Polimotor 2. По заявлению Solvay на основе результатов проектирования, масса такого двигателя должна была составить около 65 кг. Весьма характерным является выбор материалов для отдельных элементов конструкции (см. Рис. 10).

Как можно видеть, в основном применяются полимеры, которые согласно общепринятой классификации относятся к классам Engineering Polymers и в особенности к High Performance Polymers, причем в наполненных вариантах.

В целом ясно, что перечисленные концепции «полимерных» двигателей вряд ли всерьез претендуют на постановку в серийное производство. Их роль в том, чтобы продемонстрировать возможности и ограничения тех или иных подходов. Они же подсвечивают общие направления развития научно-технологической мысли.

## Рисунок 10. Материалы для проекта Polimotor 2

Применение	Полимер	Описание
Звездочка распределительного вала	Полиамид-имид	30% углеродного волокна
Насос маслопровода	Полиэфирэфиркетон	30% углеродного волокна
Водоотводящий патрубок	Полифталамид	30% стекловолокна
Уплотнение водоотводящего патрубка	Фторэластомер	
Топливная рампа	Полифенилсульфид	40% стекловолокна
Уплотнительные кольца	Фторэластомер	
Впускной топливный коллектор	Полиэфирэфиркетон	30% углеродного волокна, филаментная 3D-печать
Воздушный тракт	Полиамид 6	40% стеклянных гранул, 3D-печать выборочным лазерным спеканием
Масляный насос	Полиарилэфиркетон	30% углеродного волокна
Водяной насос	Полифенилсульфид	40% стекловолокна
Крышка распределительного вала	Полифенилсульфид	

Источник: Solvay, анализ RUPEC

В данном случае совершенно очевиден уклон в сторону наполненных реактопластов (эпоксидные и фенольные смолы) и наполненных специальных полимеров (с высокими механическими и температурными характеристиками).



# АВИАЦИОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Авиационная промышленность, разумеется, не является в глобальном масштабе крупным потребителем полимерных материалов. Однако технологические тенденции, складывающиеся в этой индустрии, исключительно важны, поскольку исторически авиакосмическая отрасль является чуть ли не основным «полигоном» для отработки тех решений, которые впоследствии перетекают в другие сферы, в частности в рассмотренный ранее автопром. Так, именно авиакосмическая отрасль первая начала промышленное применение полимерных композитов в качестве силовых элементов в отдельных узлах конструкции самолетов.

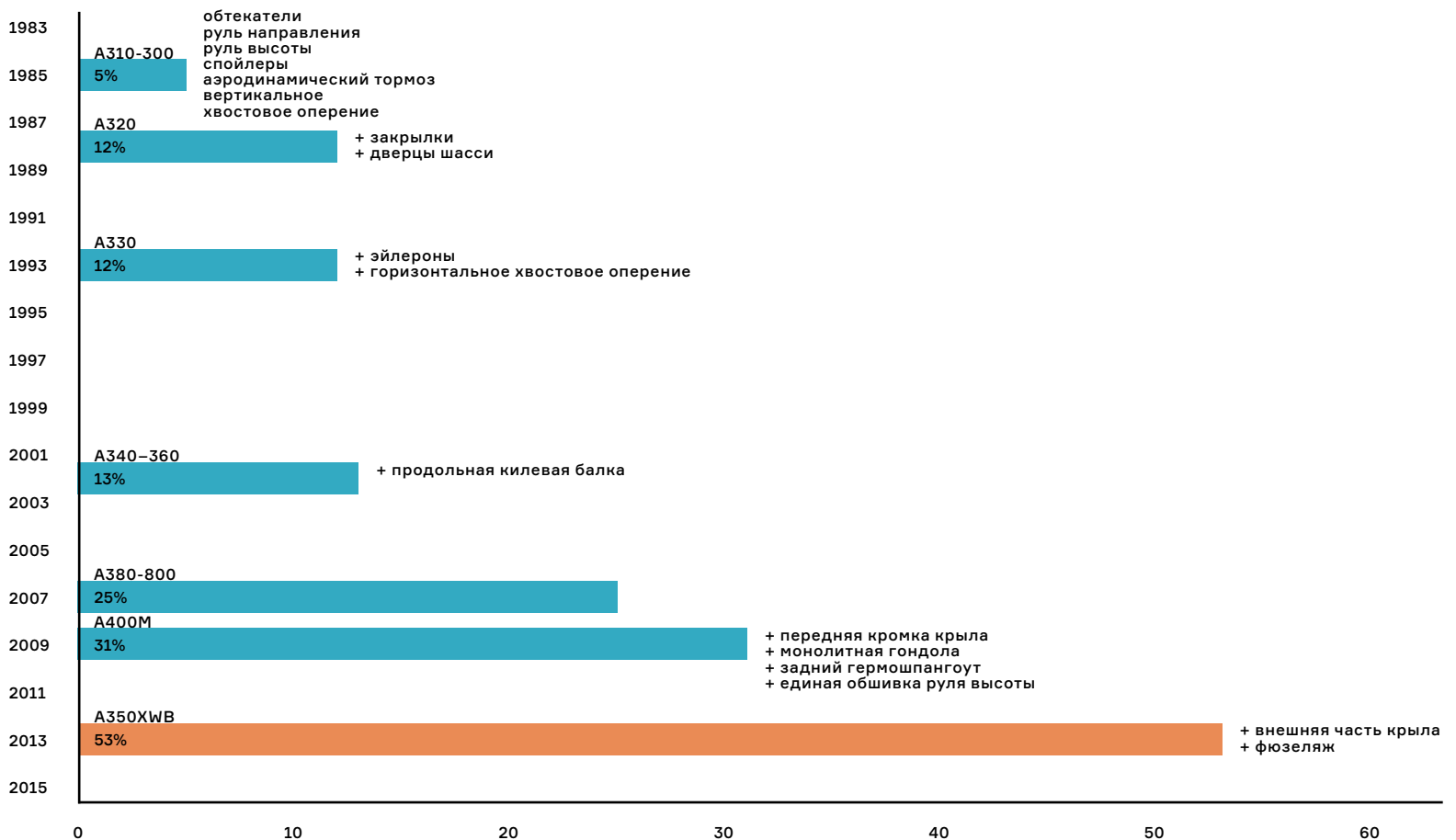
Разумеется, ключевая цель этой все еще продолжающейся трансформации — снижение веса летательных аппаратов. Востребованность этой задачи объясняется множеством преимуществ, которыми обладают более легкие самолеты. В качестве основных можно выделить увеличение полезной нагрузки (то есть веса экипажа, пассажиров, груза или вооружения) при использовании имеющихся

двигателей, более высокую топливную экономичность и, как следствие, более высокую экологичность авиаперевозок за счет снижения количества выбросов отработанных газов в атмосферу. В ходе исследования IFEU, изучавшего эффект снижения веса, было установлено, что 10%-е снижение массы самолета приводит к сохранению 9,3% энергии при перелете на короткие дистанции и 8,6% при длительных перелетах. Эти цифры аналогичны экономии топлива за весь цикл использования самолета в размере 295 и 258 тонн на каждые 100 кг сокращения веса или снижению выбросов CO<sub>2</sub> в размере 1200 или 1100 тонн на каждые 100 кг сокращения веса для коротких и длинных перелетов соответственно (данные для самолета Airbus A320).

Темп изменений, случившихся в последние несколько десятилетий, огромен. Если в 1985 году Airbus A310–300 содержал всего 5% композитных материалов, то Airbus A350 XWB — уже более 50% (см. Рис. 11).

В конструкции самолета Airbus A350 XWB из композитных материалов выполнены:

## Рисунок 11. Роль композитов в самолетах Airbus



- Фюзеляж (обшивка, силовые шпангоуты, килевая балка, хвостовая часть фюзеляжа). Передняя часть фюзеляжа собирается из четырех панелей из углепластика, а задняя часть фюзеляжа — цельной конструкцией в виде бочонка.
- Внешний кессон крыла (обшивка, стрингеры, лонжероны).
- Центральный кессон крыла (обшивка, стрингеры, лонжероны).
- Хвостовое оперение (вертикальный и горизонтальный стабилизаторы).

В качестве одной из особенностей полимерных композитов в авиации стоит отметить достаточно широкое применение в качестве армирующих компонентов не только стекловолокон и углеволокон, но также и борного волокна и арамидных волокон. Последние хорошо известны также в космической индустрии, причем не только в качестве армирующих материалов, но и в качестве материалов для производства нитей с особыми свойствами. Наряду с ними применение нашли такие специфические классы полимеров, как полиоксазолы и жидкокристаллические полиэфиры. Некоторые применения описаны на Рис. 12.

## Рисунок 12. Волоконные полимеры в космической промышленности

Торговая марка	Структура	Применение
VECTRAN		Используется подразделением внекорабельной мобильности NASA и для всех приземлений на Марсе: Mars Pathfinder в 1997 году, Exploration Rovers Spirit and Opportunity в 2004 году, а также Научной лабораторией Марса NASA в 2011 году в кабельных перемычках.
TWARON		Усиление в композитных деталях, таких как обтекатели, и грузовых авиационных контейнерах; сдерживающие ремни, используемые в турбинных двигателях для защиты салона в случае отказа двигателя.
ZYLON		Плетеные нити Zylon поддерживают структуру полиэтиленовых шаровозондов сверхвысокого давления.
TECHNORA	$\left( \text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NHOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO} \right)_m \left( \text{HN}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NHOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO} \right)_n$	Тросы для самого крепкого и самого большого сверхзвукового парашюта, используемого NASA для Curiosity Rover.

Как и в случае с автомобильной промышленностью, важнейшим вызовом для полимерных/композитных материалов в авиации является их адаптация для использования в элементах энергетических установок. В типичном современном самолете (например, Boeing 737–800) на двигатель и связанные с ним системы (гондолу) приходится более 17% веса. При этом логика внедрения легких материалов в реактивных двигателях с большой степенью двухконтурности несколько отличается от таковой в ДВС для автомобилей: снижение веса вращающихся элементов позволит снизить требования к механическим свойствам сопровождающих и поддерживающих конструкций и получить выраженный мультипликативный эффект на вес системы целиком. С другой стороны, температурные стрессы в реактивных двигателях выше (впрочем, локально), чем в ДВС.

Первой компанией, которая успешно внедрила коммерческий реактивный двигатель, имеющий композитные лопасти, был американский машиностроительный холдинг GE. Его первоначальный двигатель GE90, который вступил в эксплуатацию на Boeing B777 в 1995 году, имеет вентилятор диаметром 3 метра с 22 лопастями, которые были формованы из эпоксидной смолы, армированной углеродным волокном. Поверхностное покрытие из полиуретана уменьшало износ лезвия, в то время как передняя титановая кромка обеспечивала защиту от ударов (птицы, куски льда и другие посторонние предметы).

Корпус удержания лопастей вентилятора, разработанный для двигателей нового поколения GENX, содержал комбинацию биаксиальных и триаксиальных углеродных/эпоксидных нитей, сплетенных вокруг корпуса вентилятора. Утверждается, что эта композитная конструкция лучше систем арамид/алюминий, широко используемых в других двигателях, так как позволяет избежать сбора влаги и коррозии на границе раздела между двумя материалами. Очевидно, что с уменьшением массы самого двигателя композиты можно будет использовать и в качестве основного материала для гондол.

Впрочем, каким в итоге будет вектор развития технологий в части реактивных двигателей нового поколения, пока предсказать трудно, поскольку все большее распространение в производстве их элементов (например, тех же лопаток) получают методы 3D-печати металлами, что может скорректировать фокус на снижение массы элементов в пользу дешевизны их производства.

# СТРОИТЕЛЬСТВО

Расширение применения полимерных материалов в строительстве — наверное, самая амбициозная задача, которая стоит перед полимерным бизнесом в ближайшем будущем. Дело в том, что, во-первых, строительство итак уже выступает вторым (после упаковки) по значимости потребителем полимеров (около 20% в мире), а во-вторых — является самым крупным потребителем конструкционных материалов среди всех видов экономической активности человека. Мировое производство бетона составляет около 4,2 млрд тонн, стали — 1,6 млрд тонн. 49% стали в мире используется в строительстве — чуть менее 800 млн тонн ежегодно. Можно сравнить с глобальным производством полимеров и смол всех типов для всех применений — 322 млн тонн, 269 млн тонн — по крупнотоннажной

группе (по данным Plastics Europe). При этом на долю строительства приходится 20% выпуска. Таким образом, перевес в пользу традиционных конструктивных строительных материалов составляет 100 раз для бетона и 20 — для стали.

Очевидно, что полимерам довольно трудно составить конкуренцию бетону: он исключительно дешев и почти идеально отвечает потребностям строительства (хотя, вероятно, это кажущееся впечатление: скорее, существующие технологии идеально адаптированы под бетон). Что касается арматуры и металлических силовых конструкций, то некоторые альтернативы просматриваются. Связаны они, как и почти во всех отраслях, которые мы рассмотрели ранее, с полимерными композитами.

### **АРМАТУРНЫЕ СТЕРЖНИ ИЗ КОМПОЗИТОВ**

При наличии коррозионных сред арматурные стальные стержни в бетонных конструкциях могут сильно изнашиваться из-за коррозии, появляются трещины, которые растут и в дальнейшем приводят к раскалыванию бетона. Конструкции, построенные с использованием черной стали, как правило, нуждаются в ремонте спустя 5–10 лет после начала эксплуатации и часто нуждаются в серьезной реконструкции уже через 20 лет. Поэтому интересна возможность замены стальных арматурных стержней альтернативной арматурой, которая обладает высокими прочностными характеристиками, но лишена недостатков стальной арматуры. В качестве такой замены может использоваться арматура из армированного волокнами полимера (FRP).

Армирующие стержни из композитных материалов имеют ряд преимуществ перед обычной армирующей сталью, а именно:

- отсутствие коррозионной активности;
- высокая прочность на растяжение;
- малый вес;
- высокое сопротивление усталости;
- магнитная и электрическая изоляция;
- малая деформация ползучести.

В результате арматурные стержни из усиленных волокнами полимеров находят применение в бетонных конструкциях, подверженных воздействию агрессивных сред, таких как установки для очистки сточных вод и отходов химических производств, дамбы, пирсы, плавучие доки, подводные сооружения и т. п. Однако более широкого применения эти изделия пока не получили, и одной из основных проблем, сдерживающих их повсеместное внедрение, является отсутствие унифицированных стандартов как для самих стержней (прочность, модуль упругости, свойства сцепления, долговечность и т. д.), так и для бетонных конструкций с их использованием. Это, впрочем, не единственные ограничения:

- При воздействии растягивающего усилия в направлении волокон FRP демонстрирует линейно упругую работу вплоть до разрушения. Таким образом, полимерные композиты не имеют предела текучести и не обладают пластичностью.
- Модуль упругости для некоторых типов полимерных композитов, а именно армированных арамидным волокном (AFRP)

и стекловолокном (GFRP), значительно ниже, чем модуль упругости стали, поэтому стержни из пластика не могут быть легко согнуты в диапазоне форм, которые в настоящее время используются в строительстве.

- Прочность сцепления арматуры из полимерных композитов с бетоном отличается от свойств сцепления стальных арматурных стержней из-за анизотропии свойств материала и разной текстуры поверхности арматурных стержней.
- Более высокая стоимость материала по сравнению со сталью.
- Слабая информированность отраслевых специалистов о возможностях арматуры из таких материалов.

### **РЕМОНТ И МОДИФИКАЦИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Объекты капитального строительства нередко нуждаются в ремонте (или тех или иных модификациях) из-за исходных ошибок в проектировании, низком качестве материалов или произведенных работ, из-за износа (ветхости) или разрушений вследствие чрезвычайных ситуаций. Некоторые традиционные методы ремонта используют наружные бетонные или стальные листы для восстановления механических свойств конструкций, таких как прочность или пластичность. В последнее время перспективным направлением является применение для этих целей армированных волокнами полимеров в виде лент, холстов или сплошных оболочек, закрепленных на несущем компоненте. Применение этой технологии началось в конце 1980-х годов в Европе (в частности, в Швейцарии) и Японии.

Волоконно-полимерные композиты используются для укрепления конструкций в двух направлениях: на изгиб и на сдвиг. Для усиления на изгиб обычно лист из композита крепится к нижней поверхности балки. Другой вариант — технология полного оборачивания балки препрегом на основе углеродного волокна. При использовании композитов с арамидными волокнами можно добиться увеличения прочности конструкции на изгиб приблизительно на 50%, на 40% — для композитов на основе стекловолокна и на 200% — при использовании углеродного волокна. Разумеется, тип волокна тут не является единственным определяющим параметром, свои роли играют и характер связующего (смолы или термопласта), геометрия армирующего фрагмента, количество слоев в конструкции, параметры нагрузки и характер самого повреждения.

Для укрепления на сдвиг несущая балка может быть полностью обернута тканью из полимерного композита либо может быть обернута её нижняя часть в виде буквы U (с креплением болтами или без), или же усиление может обеспечиваться за счет отдельных листов, прикрепленных с двух сторон балки. Прочность на сдвиг при использовании волоконно-армированных полимеров по итогам такого ремонта может даже превышать исходную. Ориентация волокна может быть вертикальной или перпендикулярной к трещинам сдвига. Эффективность укрепления на сдвиг зависит от нескольких параметров, включая качество подготовки поверхностей, коэффициент армирования в материале, характер ориентации армирующих волокон, количество слоев материала и схему обертывания.

## СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕМОНТ МОСТОВ

Для ремонта несущих конструкций уже построенных мостов применяются те же приемы, что и описанные выше при усилении на изгиб и сдвиг. Также полимерные композитные материалы, армированные различными волокнами, широко используются для ремонта мостового настила. Речь идет о замене мостового настила на настил из полимерных композитных материалов, что позволяет сэкономить до 30% стоимости по сравнению с традиционными материалами, а также дает существенный выигрыш во времени ремонтных работ. В основе метода лежит применение композитных несущих профилей со сложной внутренней геометрией в качестве основания для последующего формирования поверх них собственно дорожного полотна.

Помимо ремонта старых мостов, полимерные материалы используются для строительства новых мостов, как гибридных, с использованием комбинации полимеров и традиционных железобетонных и стальных конструкций, так и полностью композитных. В гибридных мостах полимерные композиты зачастую используются для изготовления вант моста (кабели из композитов на основе углеволокна), они отличаются высокой прочностью на растяжение, усталостной прочностью, химической устойчивостью, легкостью. Однако из-за анизотропии материала существует проблема эффективного крепления подобных кабелей с тем, чтобы крепления выдерживали нагрузки, сравнимые с нагрузками, которые может выдержать сам кабель. Также для создания несущих пролетных балок используются пултрузионные детали (высоконаполненные композиты с постоянной ориентацией волокон), трубки с намотанным волокном и балки, ламинированные композитными панелями вручную.

Так, например, в 1997 году в горном муниципалитете Понтрезна в Швейцарии был установлен 25-метровый мост, целиком выполненный из композитных материалов. В пользу композитов выбор пал в силу относительно небольшого веса деталей, что позволило транспортировать почти готовый мост в труднодоступную местность на вертолете. Кроме того, простота сборки-разборки позволяет разбирать мост в течение весеннего сезона, чтобы избежать затопления и разрушения камнями и гравием, которые тающая вода несет через русло реки. Мост транспортировали в виде двух секций, длина каждой составила 12,5 метра, одна секция была склеена, а другая прикреплена болтами. Общий вес моста составил 3,3 тонны с грузоподъемностью 500 кг/м<sup>2</sup>.

Осенью 2018 года в Китае применили несколько иной подход к созданию моста из полимеров. Речь идет о пешеходном мосте длиной 15 метров и шириной 3 метра. Мост был выполнен в виде единой неразборной детали, целиком созданной по технологии 3D-печати. На сегодняшний день это крупнейшая единичная деталь, напечатанная из полимеров. В качестве материала использовался стеклонеполненный (12,5% по массе) акрилонитрил-бутадиен-стирол (АСА), общая масса материала составила около 6 тонн. Для повышения механических свойств детали она выполнена не в виде монолита, а имеет внутреннюю усиливающую геометрию.



## СТРОИТЕЛЬСТВО ЗДАНИЙ

Использование полимеров и композитов в строительстве зданий (не в смысле материалов для декоративных, изоляционных или вспомогательных деталей, а именно в виде силовых элементов) пока распространено весьма слабо. Причины тому вполне очевидны: сталь дешевле, почти полностью отвечает потребностям отрасли, очень понятна и привычна как для архитекторов и проектировщиков, так и для строителей. По большому счету пока примеры замещения стальных силовых конструкций композитными единичны и диктуются исключительными обстоятельствами, связанными в основном с невозможностью доставлять на площадку тяжелые стальные детали или же невозможностью применить мощную грузоподъемную технику для их монтажа. Легкость композитов позволяет преодолеть эти проблемы. Второй причиной можно назвать существенно более низкую теплопроводность композитных несущих конструкций по сравнению с металлическими, что обеспечивает, например, фасадным конструкциям отсутствие так называемых мостиков холода и, соответственно, устраняет возможные температурные напряжения в стеклянных конструкциях фасада.

В качестве примера одного из первых применений композитных несущих конструкций можно привести здание SunBank (также известного как Suntrust) в Орландо, США. Там композиты использовались в качестве силового каркаса декоративных стеклянных башенок на крыше здания. Одной из причин выбора композитов здесь была их инертность по отношению к радиоволнам коммуникационного оборудования.

Более известным примером целого здания, выполненного на композитных несущих элементах, является The Eyecatcher Building в швейцарском Базеле. Изначально это пятиэтажное здание высотой 15 метров и наземной площадью 10×12 метров было собрано в качестве выставочного павильона на строительной выставке Swissbau в 1998 году, а впоследствии было разобрано и вновь возведено на постоянном месте в качестве офисного здания. Его силовой каркас состоит из трех трапециевидных рам, которые в свою очередь представляют собой пакет склеенных листов из термоотверждаемых полиэфирных смол, армированных стекловолокном. Рамы соединены деревянными пролетами. Композиционные материалы были выбраны для целей легкого монтажа и демонтажа. Еще одной причиной стала низкая теплопроводность, которая позволила встраивать рамы стекол фасада непосредственно в силовые конструкции.

## Заключение

Приведенные ранее факты требуют, разумеется, определенных обобщений в контексте исследуемого нами вопроса. Он, напомним, заключается в том, в какой мере сохраняется влияние «структурного» фактора в развитии рынка полимеров и полимерных материалов, то есть насколько остается открытым потенциал замещения условных «традиционных» материалов на полимерные.

Как можно видеть на примерах автопрома, авиации и строительства, наибольшие перспективы к дальнейшему расширению сфер применения имеют уже не просто полимеры, а почти исключительно композиционные материалы. Если говорить о матрицах (связующих), то приоритет здесь за реактопластами (смолами) или инженерными термопластами. На примере проектов «полимерного» двигателя это видно особенно наглядно. Какую-то роль сохраняет также полипропилен как в качестве «чистого» термопласта, так и матрицы для наполнения армирующими компонентами. Причины достаточно понятны: как обсуждалось в начале, поиски потенциальных ниш для замещения полимерами сегодня — это сложная задача в многомерном пространстве требований и характеристик, важнейшими из которых (часто даже важнее цены) являются механические свойства и температурный диапазон эксплуатации. И именно у композитов на основе смол и ряда высокотехнологичных полимеров эти свойства позволяют конкурировать с некоторыми цветными металлами и сплавами, а в ряде применений — и со сталью. Нагляден пример высокотемпературных композитов на основе углеволокон и полиимидных связующих в качестве перспективного материала для гражданской и военной авиации.

Впрочем, «традиционные» материалы тоже не стоят на месте. Высокопрочные стали, новые методы обработки алюминия и новые сплавы на основе магния составляют ощутимую конкуренцию композитам. Это усугубляется еще и тем, что прочностные и экономические расчеты с металлами куда более привычны для инженеров, чем с композитами, для которых не вполне закрытым остается также целый ряд вопросов масштабирования их производства и ускорения сборочных операций.

Если говорить об «обычных» полимерах базового ряда, таких как полиэтилены, полистиролы, ПВХ и ПЭТФ, то они даже не упоминались в настоящей работе. Это невнимание обусловлено тем, что они совсем не стоят на переднем крае борьбы полимерных материалов за новые ниши. Более того, в свете последних природоохранных инициатив в ЕС (которые, без сомнения, будут подхвачены частью стран за периметром блока) позиции основных термопластов точно скорректируются (как именно — вопрос отдельного исследования).

Рыночная статистика подтверждает приведенные выше выводы: так, спрос на инженерные пластики и композиты в последние 15 лет растет быстрее спроса на полимеры вообще. Учитывая, однако, что доля реактопластов, инженерных и высокотехнологичных термопластов исключительно мала в общем объеме потребляемых миром полимеров, вероятнее всего, можно говорить, что «структурный» фактор если и не сошел на нет, то весьма к этому близок.

Исследование подготовлено коллективом авторов под общей редакцией **А. Костина**  
Цитирование материалов допускается исключительно с указанием ссылки на источник.  
Цитирование на интернет-ресурсах допускается с использованием активной  
гиперссылки на [www.rupesc.ru](http://www.rupesc.ru)

© Информационно-аналитический центр РУПЕС, 2019

