

К изучению дисциплины «Технология производства композитных конструкций ракетно-космической техники»

77-48211/398498

05, май 2012

Комков М. А., Тарасов В. А.

УДК 621.744: 621.642.07

МГТУ им. Н.Э. Баумана

cm12@sm.bmstu.ru

Целью изучения дисциплины является формирование у студентов глубоких профессиональных знаний о композиционных материалах (КМ), которые являются основой для выработки инженерных навыков совместного конструкторско-технологического проектирования изделий, разработки прогрессивных технологических процессов и средств изготовления композитных конструкций авиационной и ракетно-космической техники.

«Наука и техника имеют, подобно литературе и искусству, свои модные фразы и «ходовые выражения». Одним из самых модных в настоящее время является выражение «композиционные материалы», содержащее в новой форме очень старую и простую мысль о том, что совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих».

(А. Дитц, 1962 г.)

Квалификация инженера, создающего изделия из композиционных материалов, определяется в первую очередь его технологической культурой, поскольку технология определяет с одной стороны, особенности многих конструктивно-геометрических решений, с другой – особенности структуры, механические и теплофизические свойства композитов, наконец, она определяет стоимость, надежность, качество изделия.

(В.И. Смыслов, 1992 г.)

Приведенные выше высказывания определяют основные направления для изучения и освоения рассматриваемой дисциплины на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана [1].

Развитие современной ракетно-космической техники неразрывно связано с разработкой новых конструктивных решений, прогрессивных технологий, совершенствованием существующих или созданием новых материалов. Известны металлы, керамики и полимеры, включая резины. Металлы и их сплавы изотропные, упруго–пластичные и прочные, работают в широком диапазоне температур, но подвержены коррозии, а их плотность, не считая легких сплавов, очень высокая. Полимеры легкие, пластичные, химически стойкие, но имеют низкую прочность и твердость (царапаются), температуру плавления или разложения. Керамики наоборот – жаростойкие, твердые, мало корродируют, но они очень хрупкие, следовательно, и не прочные.

Перечисленные материалы отвечают очень широкому кругу задач. Однако создание современных изделий для ракетной и аэрокосмической техники, наземного транспорта и судостроения, развитие атомной энергетики и химического машиностроения потребовали применения совершенно новых материалов, в которых одновременно сочетались бы свойства и металлов, и керамик, и пластмасс. Так в последние пять десятилетий стала бурно развиваться наука о композиционных материалах и технологических методах изготовления или формообразования из них конструкций различного назначения.

При этом само название композиционные материалы все чаще заменяется одним словом (термином) *композиты* или аббревиатурой – КМ. Однако в кругу специалистов имеет хождение словосочетание «композиционный материал», а говорить «композитный материал» считается неприличным. Хотя сказать «композитная конструкция» или «композитный корпус изделия» - вполне допустимо.

Композиционный материал или композит, представляет собой комбинацию из разнородных и нерастворимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой в единое целое за счет сил адгезионного взаимодействия на границе их раздела. Разрабатывают и создают КМ на основе двух принципов: принципа пространственно-геометрической организации структуры взаимодействующих компонентов системы устойчивой во времени, и принципа синергизма, обеспечивающего согласованное действие компонентов системы, направленное на повышение положительных и подавление нежелательных свойств в создаваемом материале.

К композитам следует относить только те материалы, которые искусственно изготовлены человеком. Например, стеклотекстолит, резинокордная нить (ткань), железобетон. Во всех примерах – это система из разнородных компонентов (наполнитель, матрица), каждый из которых придает готовому изделию свои особые свойства. Ни резина, ни кордная нить автомобильной шины или транспортной ленты не могут выполнять свои функции независимо друг от друга, но их совместная работа придает композиции желаемые свойства и поэтому должна рассматриваться как единый материал.

Ответим на вопрос. Легок ли стеклопластик? Пожалуй, нет – многие пластмассы значительно легче. Прочен ли он? Тоже нет – некоторые металлы, пожалуй, прочнее. Но редкий металл обладает такой же низкой плотностью, как стеклопластик. И редкая пластмасса столь же прочна, как стеклопластик. При этом стеклопластики химически и коррозионно стойки и имеют низкую теплопроводность. Так срок службы трубопроводов из эпоксидного стеклопластика для транспортировки агрессивных жидкостей в химической и нефтегазовой промышленности, коммунальном хозяйстве увеличивается в 5 – 6 раз по сравнению с трубопроводами из черных металлов. Такое выгодное сочетание разнообразных положительных качеств в одном материале, стеклопластике – замечательное свойство композитов вообще.

В зависимости от типа матрицы все многообразие композитов можно разделить на четыре группы: полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), керамические (ККМ) и углерод-углеродные (УУКМ). Наиболее прочными и хорошо освоенными являются КМ, армированные непрерывными стеклянными, арамидными, углеродными, борными и металлическими волокнами (рис. 1).

Так ПКМ на основе арамидных волокон (CBM, Kevlar, Армос, Русар) обладают уникальным комплексом свойств: высокой прочностью при растяжении и высоким модулем упругости, термостабильностью, хорошими усталостными и диэлектрическими свойствами, незначительной ползучестью. Благодаря низкой плотности арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические сплавы, уступая по удельному модулю упругости углеродным и борным волокнам. Арамидные волокна не плавятся, а карбонизируются (обугливаются) при температурах выше 350 °С. Арамидные волокна применяют для изготовления корпусов твердотопливных двигателей, баллонов высокого давления, бронежилетов.

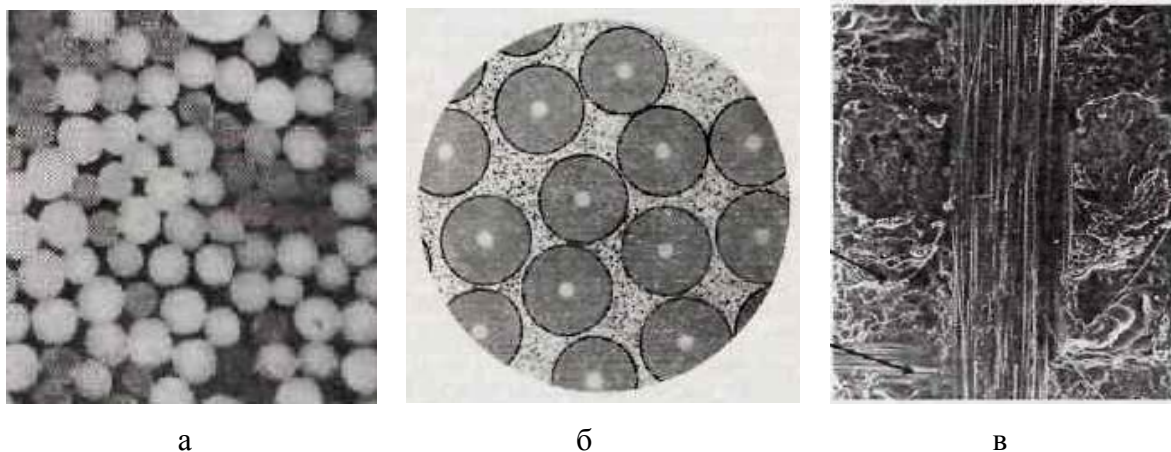


Рис. 1. Структура стеклопластика (а) (диаметр волокна $d_b = 6...8$ мкм) и бор-алюминия (б) (в центре вольфрамовое волокно диаметром 12,7 мкм); 3D направленная структура УУКМ (в)

В композитах на основе металлической матрицы (МКМ) сочетаются достоинства конструкционных металлов с достоинствами композитов. Для МКМ характерны высокие значения прочности, модуля упругости, ударной вязкости, сопротивления усталости при сохранении стабильных характеристик на большом интервале температур.

Наиболее удачная металлическая композиция – это бор-алюминий. Удельная прочность и модуль упругости бор-алюминия в 2,5-3,0 раза выше аналогичных показателей стали или алюминиевых сплавов. Из бор-алюминия изготавливаются стрингеры и лонжероны, шасси самолетов, стержни и рамы для космических кораблей. Уже в настоящее время применение различного вида композитов в конструкциях самолетов позволило снизить их массу на 20-30 %. А в дальнейшем, как предполагает фирма «Боинг», количество деталей из композитов на дозвуковых самолетах будет составлять 32 %, а на сверхзвуковых – 50 %, что приведет к снижению массы конструкции самолетов на 40 % и 65 % соответственно.

Одним из замечательных достижений материаловедов и технологов за последнее время является создание углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ), который представляет собой пространственный каркас (3D или 4D направленная структура) из углеродных волокон в матрице из пиролитического графита. УУКМ сохраняет свои механические характеристики вплоть до 2500 °С. Он легкий, термоустойчив, эрозионно стоек, имеет низкий коэффициент линейного термического расширения [2].

Углеродные волокна обладают исключительно высокой теплостойкостью. В инертной среде их прочность и модуль упругости на растяжение практически не изменяются до температуры 1500 °С. Чтобы углеродные волокна надежно работали при высоких температурах в окислительной среде, на их поверхность наносят газофазным способом защитные покрытия из пироуглерода, карбида кремния или нитрида бора [3]. При температурах вплоть до 600...700 °С углеродные волокна имеют отрицательный коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) вдоль оси волокна. Достигнутый и теоретически возможный уровень значений предела прочности и модуля упругости волокнистых наполнителей показан на рис. 2 [1].

Характерным для всех стран является то обстоятельство, что, несмотря на стремительные темпы роста исследований и производства углеродных материалов, дисбаланс производства и потребления не уменьшается. Например, производство углеродных волокон в США с 2000 г. по 2010 г увеличивалось на 30-40 % в год при сокращении цены с 300-500 до 40-50 долл/кг, в то время как спрос на углеродные волокна удовлетворялся только на 50 %. Уже в 2005 г стоимость одного килограмма углеродного волокна AS4 (США) составляла 60 долл., а российское волокно УКН-5000 стоило 2100 руб. [4].

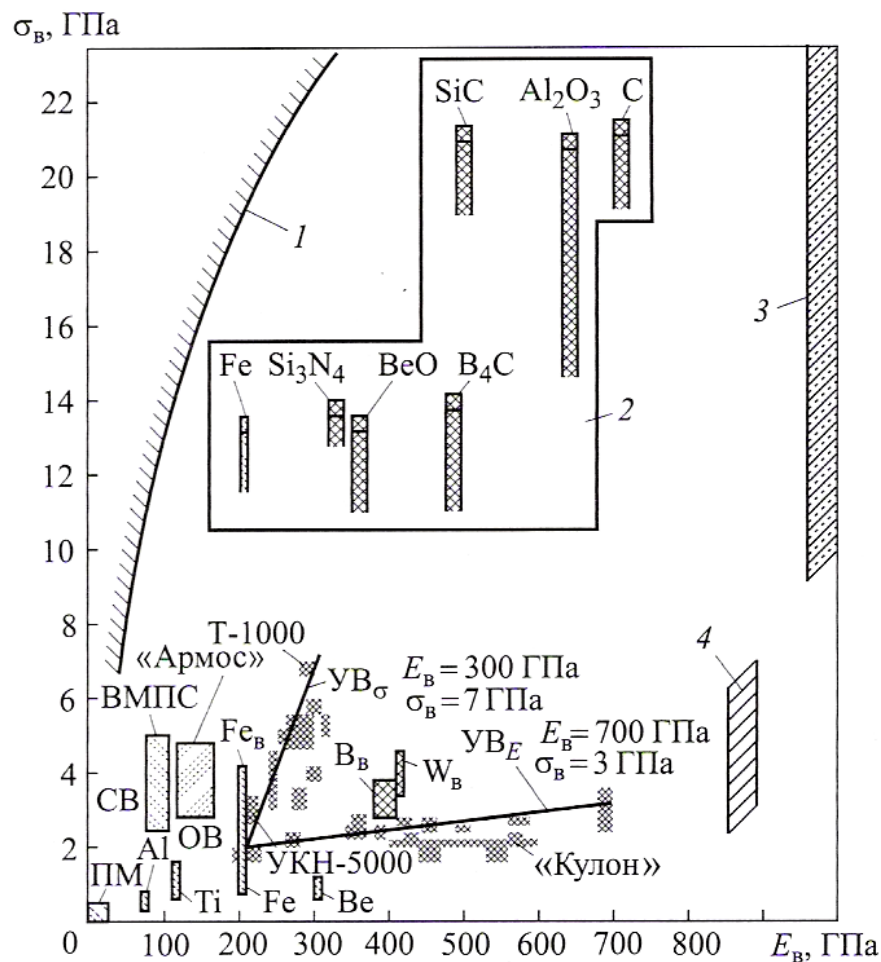


Рис. 2. Достигнутый уровень значений предела прочности и модуля упругости волокнистых наполнителей для КМ:

1 – теоретическая прочность кристаллических материалов, 2 – нитевидные кристаллы (НК), 3 – нанотрубки (НУТ), 4 – алмазы (сжатие). Углеродные волокна: УВ σ – высокопрочные, УВ E – высокомодульные. Wв – вольфрамовые волокна, Bв – борные волокна, Feв – стальные волокна, OB – органические (арамидные) волокна, CB – стеклянные волокна, ПМ – полимерные матрицы

Отметим еще две отличительные особенности волокнистых композиционных материалов: их высокую ударную вязкость разрушения и анизотропию механических и теплофизических свойств. Высокопрочные конструкционные металлы чувствительны к надрезам, ступенькам и трещинам, и, в связи с этим, имеют низкую вязкость разрушения. Трещина, раз возникнув, развивается под действием нагрузки прогрессирующим темпом. В волокнистых композитах трещина, возникнув в матричном материале, тормозится на границе раздела волокно-матрица, теряя энергию на разрушение прочных волокон. Этим и объясняется их высокая трещиностойкость и безосколочное разрушение по сравнению с

высокопрочными металлами и керамиками. Следовательно, в композиционных материалах реализуются одновременно два положительных свойства, необходимых для эффективной работы конструкции изделия, - высокий предел прочности и высокая вязкость разрушения материала.

Другой особенностью композиционных материалов является зависимость их свойств от *схемы армирования* или направления укладки волокон. Характеристики материала вдоль волокон резко, иногда на порядок и более, отличаются от характеристик, измеренных в поперечном направлении. Такую ярко выраженную анизотропию свойств необходимо учитывать и использовать при разработке структуры композиционного материала и выбора метода формообразования из него изделия. Так как в композиционном материале желаемый комплекс свойств, отвечающий условиям эксплуатации изделия, достигается не за счет создания какого-то нового вещества, а за счет удачного совмещения в одном материале веществ (компонентов) известных и привычных, то времени на опытную отработку и изготовление нового композиционного материала уходит немного. Такой подход позволяет оптимизировать конструкцию изделия уже на ранних стадиях ее проектирования, т.е. создавать материал под конкретную деталь, под ее напряженно-деформированное состояние.

Эффект анизотропии механических свойств КМ позволяет проектировать *равнонапряженные* и высокопрочные композитные конструкции, обладающие минимально возможной массой. Однако использование представленной возможности требует от инженера-разработчика аналитического обоснования схем армирования или ориентации волокон в композиционном материале и одновременно обоснования надежно реализуемых траекторий (направлений) укладки или намотки волокнистого полуфабриката (препрега, шпона, ровинга) на автоматизированном оборудовании. Таким образом, происходит смыкание и совмещение конструкторских и технологических задач, приводящее к сокращению затрат времени и средств на все виды проектных разработок и повышению обоснованности, взаимной согласованности и надежности инженерных проектов.

Становится очевидным, что на технологической стадии производства процессы формирования композиционного материала и формообразование из него конфигурации изделия, могут быть технологически совмещены с процессом сборки комплектующих деталей, входящих в сборочные единицы или узлы изделия. Следовательно, появляется возможность и условия для разработки и создания *интегральных* конструкций из ПКМ, в которых сборка готовых деталей, входящих в узел, и их соединение с силовыми

элементами конструкции корпуса, формируемого из композиционного материала, производиться за счет образования клеевых соединений, совмещенных с термообработкой и отверждением композиционного материала самого корпуса изделия.

Кроме того, используя хорошо отработанные в настоящее время методы намотки, контактного формования (выкладки) и автоклавного отверждения, из податливого волокнисто-полимерного полуфабриката - препрега можно за одну операцию изготавливать более сложные, чем из конструкционных металлов и сплавов, пространственно-геометрические конфигурации элементов изделия. Тем самым исключаются излишнее членение, множественность технологических стыков и соединений в конструкции создаваемого корпуса изделия. Экономически это выгодно, так как уменьшается число независимых элементов, входящих в конструкцию изделия, отпадает необходимость в выполнении механических соединений, достигается экономия массы и сокращаются затраты времени на сборку и изготовление изделия в целом.

Специалисты фирмы «Локхид» утверждают, что изготовление интегральных конструкций из композиционных материалов (намотка, выкладка, прессование, автоклавное отверждение) сводит к минимуму производственные затраты за счет сокращения на 65 % количества требуемых деталей, на 81 % числа сборочных операций, на 29 % трудоемкости изготовления и на 87 % необходимого крупногабаритного оборудования при значительном повышении коэффициента использования материала. Получаемое снижение массы агрегатов летательных аппаратов за счет использования КМ колеблется в пределах 12...39 %, а снижение стоимости изготовления достигает 40 % [5].

Очевидно, что материал детали, имеющей расчетную схему армирования, целесообразно производить непосредственно при ее изготовлении. Другими словами, процесс формообразования изделия должен быть *совмещен* с процессом формирования заданной структуры материала, обеспечивающей требуемые свойства конструкции. Эта сложная конструкторско-технологическая и материаловедческая задача может быть решена лишь на пути автоматизированного проектирования композитных конструкций и методов их изготовления намоткой, выкладкой, прессованием, пултрузией и др. на производственном оборудовании, имеющим числовое программное управление.

Таким образом, изучение данной дисциплины на базе совместного конструкторско-технологического проектирования неразрывно связано с разработкой новых конструкторско-технологических решений, выбором композиционного материала, методов формообразования, разработкой типовых технологических процессов, средств изготовления и производства композитных конструкций ракетно-космической техники.

Все выше сказанное, в конечном счете, представляет собой единый процесс создания из композиционных материалов конструкций различного назначения, обладающих минимально возможной массой, и изготавливаемых с наименьшими затратами труда, средств и времени.

Литература.

1. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
2. Белов Г.В., Ерохин Б.Т., Киреев В.П. Композиционные материалы в двигателях летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 344 с.
3. Мелешко А.И., Половников А.С. Углеродные композиционные материалы. М.:ИПРЖР, 2008. 138 с.
4. Разин А.Ф., Родинов В.Б., Васильев А.В. Экономические аспекты применения композитных материалов в конструкции планера пассажирского самолета //Технология машиностроения. 2005. №3. С. 5-8.
5. Применение композиционных материалов в изделиях зарубежной авиационной техники //Обзоры ЦАГИ: 1984. № 644. 96 с.; 1987. № 681. 152 с.

Regarding the study of “Manufacturing technique of composite construction of rocket-and-space machines” course

77-48211/398498

05, May 2012

Komkov M.A., Tarasov V.A.

Bauman Moscow State Technical University
cm12@sm.bmstu.ru

The authors describe students' acquisition of deep knowledge about structure, distinct features and trends of development of composite materials based on glass, aramid and carbonic fibers. Problems of modern design engineering and manufacturing of composite rocket-and-space machines are also considered.

Publications with keywords: [matrix](#), [composites](#), [technological process](#), [filler](#), [carbon fibres](#), [composite construction](#)

Publications with words: [matrix](#), [composites](#), [technological process](#), [filler](#), [carbon fibres](#), [composite construction](#)

References

1. Komkov M.A., Tarasov V.A. Tehnologiya namotki kompozitnyh konstrukcii raket i sredstv porajeniya. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011. 431 s.
2. Belov G.V., Erohin B.T., Kireev V.P. Kompozicionnye materialy v dvigatelyah letatel'nyh apparatov. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1998. 344 s.
3. Meleshko A.I., Polovnikov A.S. Uglerodnye kompozicionnye materialy. M.: IPRJR, 2008. 138 s.
4. Razin A.F., Rodinov V.B., Vasil'ev A.V. Ekonomicheskie aspekty primeneniya kompozitnyh materialov v konstrukcii planera passajirskogo samoleta // Tehnologiya mashinostroeniya. 2005. №3. S. 5-8.
5. Primenenie kompozicionnyh materialov v izdeliyah zarubejnoi aviacionnoi tehniki // Obzory CAGI: 1984. № 644. 96 s.; 1987. № 681. 152 s.