

КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ РОЛЬ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В.А. Рогов¹, М.И. Шкарупа²,
А.К. Велис¹

¹Кафедра технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов
Инженерный факультет

Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

²ОАО Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»
Киевское шоссе, 15, Обнинск, Россия, 249035

В статье обсуждается классификация и особенности применения композиционных материалов в современном машиностроении. Сделана попытка просто и сравнительно доступно изложить наиболее важные сведения о применимости композитов и их роли в развитии машиностроения.

Ключевые слова: композиционные материалы, композиты, матрица композиционных материалов, ламинированные композиционные материалы, слоистые композиционные материалы, волокнистые композиционные материалы, дисперсно-упрочненные композиционные материалы.

В современном мире машиностроение и приборостроение не могут обойтись без применения композиционных материалов, обладающих сверхтвердостью, сверхпрочностью, стойкостью при высоких температурах при сравнительно малом удельном весе по сравнению с традиционными конструкционными материалами (сталью, чугуном, латунью, алюминием и т.п.).

Композиционные материалы имеют преимущество гибкой конструкции, которая может быть адаптирована требованиям конкретного проекта. На рис. 1 показаны преимущества композиционных материалов по сравнению со сталью и алюминием.

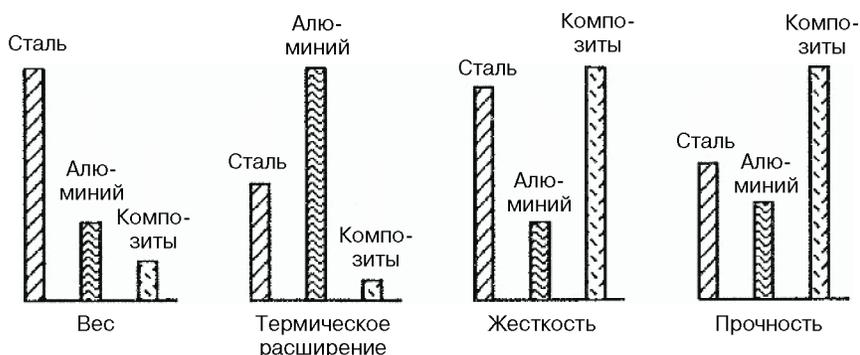


Рис. 1. Сравнение конструкционных материалов со сталью и алюминием

Композиционные материалы — это материалы, полученные из соединения двух или более компонентов в общей системе, в которой каждый компонент в отдельности сохраняет свои свойства. Композиты могут быть рассмотрены как в макро-, так и в микромаштабах, и в связи с этим можно представить их как однород-

ные или неоднородные соответственно. Когда композиты рассматриваются в микромасштабе, каждый их компонент имеет свою границу раздела. Композиты можно рассматривать как соединение более двух фаз: одна фаза непрерывна, является матрицей (1), другая прерывиста, является армирующей фазой (2) [5]. Чаще всего армирующие элементы имеют микроскопический размер, так как чем тоньше волокно или частица, тем выше их механические свойства. Матрицы композитов могут быть выполнены на основе металлов и их сплавов, а также органических и неорганических полимеров, керамических, углеродных и других материалов, и цена на них зависит от их механических свойств: чем лучше механические свойства, тем дороже матрица. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композита и его эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Наполнители или армирующие элементы используются для упрочнения композита и могут быть сделаны из высокопрочной стали, молибдена, вольфрама и других металлов и их сплавов, волокон из бора, углерода, стекла, монокристаллов из оксидов, нитридов алюминия и кремния и других соединений.

Композиционные материалы могут быть разделены по нескольким основным признакам:

- по материалу матрицы и армирующим компонентам;
- структуре — геометрии (морфологии) и расположению компонентов (структурных составляющих);
- методу получения;
- области применения [6].

Однако для лучшего понимания физико-химических свойств композитов будем классифицировать их в соответствии с морфологией фаз, составляющих их микроструктуру или геометрией компонентов [6]:

- волокнистые композиционные материалы — материалы, состоящие из волокон в матрице (матрицу композиционных материалов — связующий материал, клеящий материал или объединяющий материал);
- ламинированные (слоистые) композиционные материалы, состоящие из слоев различных материалов, связывающих матрицей;
- дисперсно-упрочненные композиционные материалы;
- комбинация из некоторых или всех из первых трех типов.

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен композит. Для изготовления композитов, применяемых при температурах ниже 200 °С, используют полимерные матрицы.

В настоящее время широко используются композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, — стеклопластики. Они легко поддаются механической обработке, обладают высокой прочностью, устойчивостью к тепловым ударам и знакопеременным нагрузкам, радиопрозрачностью, коррозионной стойкостью. В качестве армирующего элемента могут использоваться непрерывные волокна в виде нитей, жгутов, или ткани. Слоистые стеклопластики на основе тканей называются стеклотекстолитами. Наиболее высокие механические харак-

теристики имеют стеклотекстолиты на основе однослойных тканей сатинового переплетения. Применение многослойных стеклотканей увеличивает межслоевую прочность пластика, упрощает сборку заготовки изделия, уменьшая число ручных операций. Такие композиты широко используют в судостроении, авиации, в космической технике, автомобилестроении, при изготовлении некоторых бытовых приборов. В качестве связующего используются как терморезактивные смолы (эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и др.), так и термопластичные. Органопластики на основе высокопрочных арамидных волокон обладают высокими прочностными и упругими характеристиками, ударной вязкостью, высокой химической стойкостью, высокими теплоизоляционными и диэлектрическими свойствами, плохо горят и выделяют мало дыма, органопластики — самые легкие полимерные композиционные материалы, их плотность составляет 1250—1350 кг/м³.

В зависимости от состава, структуры и технологии получения материалов свойства органопластиков могут меняться в широких пределах: прочность при растяжении $\sigma_{\text{в}}$ от 300 до 3000 МПа, модуль упругости E от 13 до 100 ГПа. По удельной прочности при растяжении (200 км) органопластики занимают ведущее место среди конструкционных материалов. Для органопластиков характерны высокие параметры вязкости разрушения, длительность ресурса и надежность эксплуатации изделий в условиях воздействия механического или акустического удара, эродирующих потоков, вибрационных нагрузок. Благодаря пониженной плотности, низкой дымообразующей способности, высоким эстетическим качествам органопластики используют при обшивке салонов самолетов, судов, автомобилей, для внутренней отделки жилых и промышленных зданий. При изготовлении современных вертолетов с использованием органопластиков повышается их эксплуатационная надежность, сокращается примерно в 3 раза производственный цикл, достигается снижение массы агрегатов на 20—30%, снижается трудоемкость и увеличивается ресурс их работы.

В пассажирских самолетах ТУ-204, ИЛ-96-300, ИЛ-114, ТУ-334 органопластики использованы в панелях пола, деталях внешнего контура, обшивке салонов. Так, в самолете ТУ-204 объем органопластиков по массе составляет около 3 т, в самолете ИЛ-96-300 — 1,5 т.

Органопластики используются при изготовлении защитных экранов в корпусах вентиляторов турбореактивных двигателей, поскольку могут выдерживать механический удар, который может иметь место при столкновении самолета с птицей. Например, вентиляторы двигателей самолетов «Руслан» имеют защитные кольца диаметром 2,5 м и толщиной 45 мм и могут выдерживать при скорости 300 м/с удар осколков массой до 1 кг. Материалами нового поколения являются металлоорганопластики-алоры, состоящие из чередующихся слоев алюминиевого сплава и органопластика, который снижает нагруженность металла и увеличивает долговечность материала в целом. По сравнению с традиционными материалами они обладают высокой трещиностойкостью, что позволяет изготавливать из них безопасно повреждаемые конструкции на воздушном и автомобильном транспорте.

Применение алора взамен традиционных алюминиевых сплавов обеспечивает снижение массы конструкции на 10—20% при использовании тканевого арамид-

ного наполнителя и в 2 раза — однонаправленного. При этом значительно снижается масса изделия.

Алор обладает высокими демпфирующими характеристиками, поэтому он используется в конструкциях, подверженных высокочастотным колебаниям (вагоны скоростных поездов, автомобили, самолеты и др), что позволяет увеличить ресурс их работы в несколько раз. Он технологичен, хорошо поддается всем видам механической обработки, пластическому деформированию.

Углепластики-композиты на основе высокопрочных углеродных подоков, являются наиболее перспективными композиционными материалами. Они обладают высокими прочностью и жесткостью, термостойкостью до 570 °К, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), стойкостью к агрессивным средам. В качестве армирующих элементов в них применяются непрерывные волокна в виде нитей, жгутов, тканей или нетканых материалов. Матрицы изготавливают из эпоксидных, полиамидных, полиэфирных или других смол. Углепластики используются в конструкциях современных самолетов, например таких, как «Руслан», Су-30МК, Су-34, С-37 «Беркут», МИГ-29, космических кораблей много-разового использования «Буран», что доказывает их высокую техническую эффективность и эксплуатационную надежность. Углепластики КМУ-ЛР, КМУ-ЛТК и КМУ-Т работают в интервале температур от -60 до $+100$ °С, в том числе в агрессивных средах, имеют высокие физико-механические характеристики.

Волокнистые композиты имеют чаще всего пластическую матрицу, армированную высокопрочными волокнами, проволокой или кристаллами в форме ниток. В этих композитах основные напряжения воспринимаются волокнами вдоль композита. Волокна обеспечивают прочность и жесткость композита в направлении расположения волокон. Механические свойства и механизм разрушения композита определяются соотношением трех параметров: 1) прочностью волокон, 2) прочностью и жесткостью матрицы, 3) прочностью связи волокно-матрица.

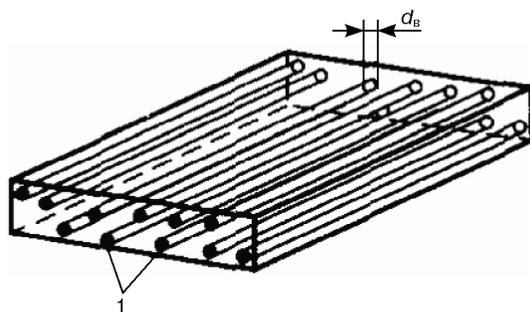


Рис. 2. Волокнистый композит:

1 — волокна в матрице, d_b — диаметр волокна

Волокнистые композиты можно классифицировать по природе компонентов и по типу наполнителя, а также их расположению в матрице. Таким образом, по природе матрицы композита можно выделять композиционные материалы на основе полимеров или так называемых пластиков; металлов и их сплавов; керамики; углерода. По природе арматуры композитов можно выделить следующую классификацию: стеклопластики; боропластики; углепластики и т.п. [5].

Обычно для армирующих элементов используются металлические проволоки, нитевидные кристаллы (усы) и кристаллы фаз, полученных направленной кристаллизацией; волокна неметаллов, таких как углерод и бор, полученных по специальным технологиям; керамические волокна на основе Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 и др.; стекловолокно; органические волокна (полиэтиленовые, полиэфирные, полиамидные и др.) [6].

Матричные материалы в волокнистых композитах обеспечивают их монолитность, форму и фиксируют взаимное расположение армирующих волокон, распределяют действующие напряжение по всему объему композита, а также перераспределяют нагрузку вдоль волокон в случае разрушения их части. От материала матрицы зависит метод производства изделий, габариты, методы обработки и т.д. Таким образом, для выбора матрицы для композита очень важны его эксплуатационные и технологические параметры.

К эксплуатационным параметрам композита относятся механические и физико-химические свойства матрицы, при которых система «волокно—матрица» обеспечивает стабильную совместную работу. Механические свойства матрицы должны обеспечивать стабильную работу всего композита при эксплуатации, так как прочность и жесткость являются определяющими при нагрузках в направлениях, отличных от направления армирующих элементов композита. Также учитываются переменные напряжения, действующие на композит и температуру при его работе. Известно, что высокая температура снижает все характеристики композита; из этого следует, что при выборе его составляющих компонентов должна учитываться их теплостойкость, а также их химическая стойкость.

К технологическим параметрам композита относятся все процессы получения изделия из него. Это процесс размещения волокон в матрице без касания между ними, прочные действия на границе «волокно—матрица» (хорошая адгезия) и т.д. Поэтому материал матрицы должен иметь следующие свойства: хорошая смачиваемость, возможность получения полуфабрикатов для получения изделий из них, хорошее соединение ее фаз при формовании композита, низкие параметры температуры и давления при обработке образцов и т.п.

Максимальные напряжения композита при эксплуатации появляются непосредственно или вблизи зоны раздела «волокно—матрица», поэтому уровень свойств композитов определяется свойствами границы раздела его компонентов. Это, в свою очередь, определяется адгезией на границе раздела компонентов композита. Значит, адгезия не должна меняться при эксплуатации композита в параметрах, для которых изделия из него рассчитаны.

Ламинированные композиты состоят из двух и более слоев разных материалов, связанных вместе. Ламинирование используется для объединения лучших свойств материалов, входящих в состав композита, таких как прочность, жесткость, малый вес, коррозия, стойкость, износостойкость, теплоизоляция, звукоизоляция и т.д.

К слоистым композитам относятся биметаллы, имеющие в составе два разных металла с очень разными коэффициентами линейного расширения α -слой, β -слой (рис. 3). При изменении температуры биметаллы деформируются, и эту деформацию можно точно определять, поэтому биметаллы используют для производства

измерительных приборов. Например, алюминий и некоторые высокопрочные алюминиевые сплавы обладают низкой коррозионной стойкостью, поэтому высокопрочный алюминий, покрытый коррозионным алюминиевым сплавом, обладает одновременно высокими прочностью и коррозионной стойкостью. Можно называть слоистое стекло и ламинаты на основе пластиков как слоистые КМ.

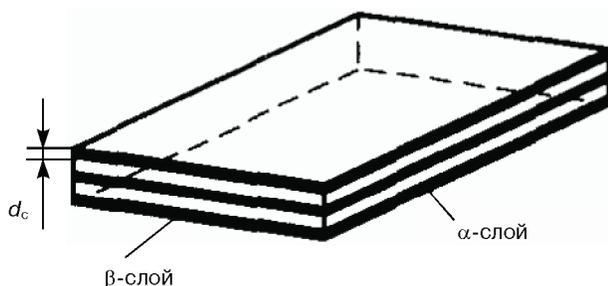


Рис. 3. Слоистый композит:

d_c — толщина слоя в слоистом α – β -композите

Для увеличения прочности композитов используются металлические и неметаллические мелкодисперсные частицы (рис. 4), рассеянные по всему объему композита, где матрица может быть металлической или неметаллической. Обычный пример неметаллического композиционного материала — бетон, где частицы песка равномерно распределяются и закрепляются цементом. Бетон является матрицей, скрепляющей частицы песка вместе. Для прикрепления песка и бетона используют химическую реакцию между цементом и водой. Особенностью этих композитов является распределение частиц в матрице в хаотическом порядке, что способствует более равномерному распределению нагрузки по всему объему изделия.

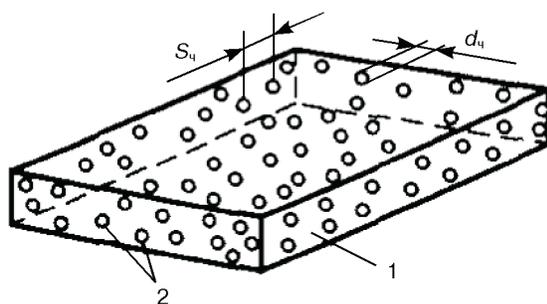


Рис. 4. Композит с армирующими частицами:

1 — матрица; 2 — армирующие частицы диаметром $d_ч$;
 $S_ч$ — расстояние между частицами

Количество частиц в составе композита может либо упрочнять матрицу, препятствуя развитию дислокаций при нагрузках, либо разгружать матрицу, принимая часть нагрузки. В зависимости от количества частиц в матрице можно выделить два случая [6]:

— частицы в композите составляют 1—15%, их размер $d_ч \ll 1\text{мкм}$. Роль частиц — препятствовать дислокационному скольжению матрицы, укрепляя ее. Ис-

пользуют оксиды, бориды, карбиды, силициды в качестве дисперсной фазы. Можно использовать интерметаллиды, которые обладают высокой твердостью и химической устойчивостью. Самая лучшая эффективность упрочнения матрицы достигается при размере частиц, $d_{\text{ч}} = 0,1$ мкм и расстоянии между ними, $S_{\text{ч}} = 0,01$ — $0,3$ мкм и количестве 15%;

— содержание частиц достигает 25%, матрица разгружается, так как приложенная нагрузка воспринимается от матрицы армирующими компонентами, т.е. частицами. В качестве армирующих элементов используют металлы, интерметаллиды, оксиды, нитриды, и др.

Многофазные композитные материалы обладают более чем одной характеристикой каждого класса: волокнистого или ламинированного. Например, железобетон является дисперсно-упрочненным (потому что состоит из гравия в связующей цементной пасты) и волокнистым (из стальной арматуры). Ламинированные и армированные волокнами композитные материалы являются слоеными и волокнистыми композиционными материалами одновременно.

Ламинированные и армированные волокнами композитные материалы — это своего рода гибридный класс композиционных материалов с участием как волокнистых композитных материалов, так и ламинированных. Здесь слои армированных волокнами материалов приклеены друг к другу с расположением волокон в разных направлениях, чтобы обеспечить прочность и жесткость композиту на всех его направлениях. Итак, прочность и жесткость ламинированных армированных волокнами композитов всегда можно выбирать в зависимости от технологических требований к конкретному изделию.

Ламинированные и армированные волокном композитные материалы используются в ракетных двигателях, корпусах лодок, панелях крыла самолета и отсеков самолета, теннисных ракетках и т.д.

Классификацию композиционных материалов можно проводить по любому признаку:

- по конструктивному: хаотически армированные, одномерно армированные, двумерно армированные и пространственно армированные композиты;
- материалу матрицы;
- методу получения композита;
- области применения композита;
- структуре композита: геометрии и расположению компонентов [6].

В авиации и ракетно-космической технике наиболее широко используют композиты с борными волокнами. Детали из боропластика и боралюминия применяют такие крупные фирмы США, как «Локхид», «Боинг», «Дженерал Дайнемикс». Из них изготавливают горизонтальные и вертикальные стабилизаторы, рули, элементы хвостового оперения лонжероны, лопасти винтов, обшивку крыльев и др.

Область применения металлических композитов непрерывно расширяется. Помимо улучшения технических характеристик многих ответственных изделий использование металлических композитов способно обеспечить 20—30-процентную экономию массы. Современные Al-Li сплавы имеют этот показатель на уровне 10—15%.

Детали из боралюминия по сравнению с титановыми сплавами дают снижение массы на 30—40%, обеспечивая более высокую длительную и усталостную прочность при нагреве до 500 °С. Еще более эффективно применение боралюминия в ракетно-космической технике. Его использование для изготовления крупных деталей для ракет «Атлас», космических кораблей «Аполлон», «Шаттл» позволило уменьшить их массу на 20—50%. Это, в свою очередь, увеличило полезную нагрузку, а для военных самолетов — дальность полета, объем вооружения и т.д. Снижение полетной массы истребителя F-15 на 6%, или около 1100 кг, приводит к увеличению дальности полета на 15%.

Фирма Toyota (Япония) изготовила металлические композиты для деталей автомобилестроения. Алюминий армировали смесью коротких волокон Al_2O_3 и SiO_2 (диаметр около 3 мкм и длина до 10 мкм) в различных соотношениях. С увеличением массовой доли волокон Al_2O_3 возрастает прочность и модуль упругости, при росте доли волокон SiO_2 повышается износостойкость. Этот материал использовали вместо никелевых сплавов для изготовления накладок поршней, что позволило поднять температуру в камере сгорания двигателя и его мощность. За счет увеличения износостойкости поршней пробег автомобиля увеличен до 300 тыс. км.

Производство таких металлических композитов, по мнению японских специалистов, откроет промышленную технологию следующего поколения.

Правильный выбор материалов с целью экономии массы летательных аппаратов играет определяющую роль. Стоимость конструкции составляет 40% для военных самолетов, 68% — для коммерческих, 19% — для космических аппаратов, 50% — для орбитального космического корабля типа «Шаттл». В космической технике экономии массы принято оценивать через стоимость вывода 1 кг массы на орбиту с учетом числа запусков. Учитывая, что отношение исходной массы к массе, доставленной на околоземную орбиту, составляет 100 : 1, эта величина может составлять до 30 тыс. долл/кг. Применение композитов в конструкции космического корабля «Шаттл» позволило снизить массу на 1402 кг, в том числе за счет боропластика — на 410 кг и боралюминия — на 82 кг. Такая экономия массы позволила уменьшить затраты на вывод корабля на орбиту на несколько миллионов долларов, что заранее окупает затраты на стоимость элементов конструкции из этих материалов.

В заключение можно сказать, что любая классификационная система является произвольной и несовершенной, тем не менее она должна демонстрировать широкие возможности композиционных материалов, их применение, получение и обработку.

ПРИМЕЧАНИЯ

- (1) Слово «матрица» имеет в данном контексте значение «соединение»; не путать с математическим значением.
- (2) Со значением укрепляющего КМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Bob Matthews // Engineering Specialist Structural Analysis. General Dynamics Convair Division.*
- [2] *Шибиков В.Г., Калашиников В.И., Соколова Ю.А. и др. Производство композиционных материалов в машиностроении: Учеб. пособие. — М.: КНОРУС, 2008.*
- [3] *Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2007.*
- [4] *Robert M. Jones. Mechanics of Composite Materials 2nd Edition Printed by Taylor and Francis Inc. 1999.*
- [5] *Васильев В.В. Композиционные материалы: Справочник — М.: Машиностроение, 1990.*
- [6] *Карабасов Ю.С. Новые материалы. — М.: Изд-во МИСИС, 2002.*
- [7] *Рогов В.А. Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения. — М.: Масштаб, 2006.*

CLASSIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS

**V.A. Rogov¹, M.I. Shkarupa²,
A.C. Veliz¹**

¹Department of Mechanical Engineering, Metal-cutting machines and tool
Engineering Faculty
People's Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

²Obninsk Research and Production Enterprise "Technologiya"
State Research Centre of Russia
Kievskoe shosse, 15, Obninsk, Russia, 249035

This paper is an introduction to composite materials CM. We tried to be simple in our explanation about CM and tried to give the most necessary knowledge to introduce the reader to the amazing world of composites.

Key words: fibrous composite materials, composite materials, composite, composite material matrix, laminated composite materials, particulate composite materials, combination of composite materials, matrix.