

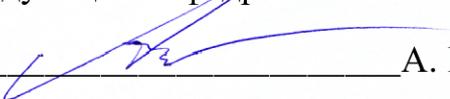
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт  
Кафедра «Машиностроение и материаловедение»

Утверждено на заседании кафедры  
«Машиностроение и материаловедение»  
« 30 » января 2023 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой

  
\_\_\_\_\_ А. В. Анцев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по проведению практических (семинарских) занятий**  
**по дисциплине (модулю)**  
**« Структура и свойства композиционных материалов »**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы магистратуры**

по направлению подготовки  
**15.04.01 Машиностроение**

с направленностью (профилем)  
**Машины и технологии композиционных и функциональных материалов**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 150401-05-23

Тула 2023 год

**Разработчик методических указаний**

Сержантова Галина Валериевна, доц. каф. МиМ, к.т.н., доц.  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

## Введение

В настоящее время интенсивно ведется разработка легких, высокопрочных и недорогих конструкционных материалов. В результате многие материалы достигли предела своих свойств. Как следствие, ученые, перед которыми стоит задача существенного улучшения свойств, вынуждены создавать принципиально новые материалы, примером которых являются композиты.

В действительности, композиты – не так уж и новые материалы. Композиционными называют материалы, состоящие из двух или более компонентов или фаз, а под эту классификацию подходят, например, известные древним цивилизациям саманные кирпич, делавшиеся из армированной соломой глины. Бетон также подходит под это определение, поскольку он состоит из смеси камней, скрепленных цементом. Кроме того встречаются композиты и в природе, как, например, кости, раковины моллюсков или древесина.

В последнее время происходит быстрый рост производства искусственных композитов на основе высокопрочных волокон и различных полимерных матриц. Согласно прогнозам, производство композиционных материалов будет возрастать и далее, причем будет увеличиваться относительная доля композитов на основе металлов и керамики.

Большой интерес к композиционным материалам объясняется замечательным комплексом их конструкционных свойств. И в самом деле, история материаловедения не знает подобного примера повышения прочности в 2 раза, модуля упругости и предела выносливости в 3 раза (по сравнению с неармированными материалами), а также исключительно большой возможности снижения материалоемкости конструкций при одновременном повышении их прочности, жесткости и увеличении весовой эффективности.

Разработка композиционных материалов требует знакомства с несколькими смежными науками. Например, для создания коррозионно-стойкого композиционного материала нужно знание химии и материаловедения. Проектирование несущих конструкций из композита требует также инженерных знаний.

Поэтому для дальнейшей разработки композитов и эффективного проектирования изделий из них необходимо, чтобы специалисты разбирались во всех перечисленных областях знаний.

Курс "Структура и свойства композиционных материалов" читается для студентов в рамках системы магистерской подготовки направления подготовки 15.04.01 Машиностроение; профилю подготовки: Машины и технологии композиционных и функциональных материалов.

Он рассматривает современные физические представления о взаимосвязи структуры и свойств промышленных материалов, способы управления процессами их структурообразования для получения заданных свойств, вопросы разработки и применения высокоэффективных конструкционных и композиционных материалов различного назначения. Основное внимание уделяется анализу физических механизмов создания и упрочнения конструкционных и композиционных материалов, роли дефектов строения в формировании заданного уровня прочностных свойств инженерных материалов для различных условий температурно-временного и силового нагружения.

Данные методические указания должны использоваться при освоении разделов дисциплины, вынесенных на семинарские занятия, соответствующие разделы которых указаны в рабочей программе.

На семинарских занятиях студент осваивает следующие разделы.

1. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы
2. Композиционные материалы, упрочненные частицами
4. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей
5. Волокнистые КМ с неметаллической матрицей
6. Слоистые композиционные материалы.

Темы семинарских занятий:

1. Дисперсно-упрочненные КМ: состав, структура, свойства и область применения.

2. КМ, упрочненных частицами: состав, структура, свойства и область применения.
3. Волокнистые композиционные материалы: состав, структура, свойства и область применения.
4. Слоистые композиционные материалы: состав, структура, свойства и область применения.

Подготовка содержания конспекта и изучение указанных тем ведётся с помощью изучения и анализа предложенной ниже литературы и выработки знаний, умений и навыков по данной дисциплине.

На семинарских занятиях студенты делают доклады по выбранным ими темам и проходит обсуждение рассматриваемого материала.

## Практическая работа

### Проектирование структуры и свойств композиционных материалов с дискретными волокнами

Цель работы: изучить метод выбора материала компонентов, рецептуры, расчетные зависимости композиционного материала на примере композита с хаотично ориентированными дискретными волокнами.

#### **1. Общие положения и порядок выполнения расчетной работы**

Студент получает и выполняет один из вариантов заданного преподавателем задания. **ЗАДАНИЕ:** выбрать материалы матрицы и волокон двухкомпонентного композита с хаотичной дискретной армирующей фазой, дать оценку энергоемкости изготовления возможных вариантов проектируемого материала. Для спроектированного материала рассчитать плотность, прочность, удельную прочность и энергоемкость изготовления. Для всех вариантов заданий исход-

ными данными являются: одноосное растяжение стержня длиной  $L = 0,45$  (м), сечением  $S=10^{-4}$  (м<sup>2</sup>), массой  $M$  (кг), силой  $N =$  (Н) в нейтральной среде при температуре  $T \sim 293$  К. Факторы срока службы в расчете не учитываются. Плотность проектируемого композита может быть ниже на 10% требуемой величины. Численные значения задаются преподавателем.

## 2. Краткие сведения из теории

Разработка изделий из композиционных материалов (КМ) связана не только с формообразованием и тепловой обработкой, но и с формированием его структуры и физико-механических характеристик, выполняемым на стадии проектирования КМ. Таким образом, создание деталей из КМ - наглядный пример воплощения триединства материала, конструкции и технологии, поскольку в процессах проектирования и изготовления предусматривается и обеспечение основных свойств материала изделия. Наибольшая эффективность использования КМ достигается при решении задач сокращения металлоемкости, исключения тепловых операций (энергозатрат), повышения характеристик прочности, долговечности и надежности (удельной прочности), снижения веса конструкций и повышения технологической производительности в сочетании с гибкостью и универсальностью метода КМ,

**Композиционными материалами** (composite, англ. - сложный составленный из чего-либо) являются искусственно созданные человеком матричные материалы, содержащие два или более компонента, гетерофазные по строению, однородные в макро - и неоднородные в микро мае штабе, обладающие аддитивным комплексом физико-механических свойств, обусловленным сохранением индивидуальности каждого образующего композит компонента.

В промышленных масштабах композиты получают методами порошковой металлургии, переработки полимеров и олигомеров.

Структурными элементами КМ являются матрица и арматура, размещенная в непрерывной среде первой. По внутренней архитектуре (структуре) КМ клас-

сифицируют на непрерывно армированные (сетки, ткани, фольги, жгуты и системы нитей) и дискретные (частицы, пленки, короткие волокна и войлоки). Кроме того, ориентацию арматуры делят на хаотично ориентированную и специально ориентированную (анизотропную и изотропную, ортогонально армированную и т. п.).

## 2.1. Принцип комбинирования компонентов композиционных материалов

Научные основы проектирования КМ составляет принцип комбинирования. В свою очередь он основан на совокупности двух принципов: сочетания свойств и физико-химической, механической совместимости.

Принцип сочетания подразумевает сложение физических свойств компонентов аддитивным образом. Второй принцип дает границы возможности сочетания компонентов и подразумевает сохранение всех отличительных признаков КМ при его изготовлении и эксплуатации.

Основными математическими выражениями принципов комбинирования компонентов в КМ являются:

а) зависимости структурных соотношений компонентов. Например, аналитические выражения для КМ, имеющих поры, отражающие связь между кажущимися и истинными долями волокон и матрицы, а также выражения, интерпретирующие диаграммы состояния компонентов и законы диффузии;

б) зависимости концентрационных соотношений компонентов. Например, выражение, устанавливающее связь между прочностными и упругими характеристиками однонаправленного КМ через долю волокна

$$\sigma_{y\theta' p} = \frac{\sigma_{me' p}}{K_{\sigma}}$$

в случае поперечного растяжения материала:

где

$$K\sigma = \frac{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)}{1 - \left(4 \frac{V_f}{\Pi}\right)^{0,5} - \frac{E_m}{E_f}}$$

где 'р - относящийся к напряжению растяжением;  $V_f$  - доля волокна;  $E_m$  и  $E_f$  - модули Юнга матрицы и волокна;  $\sigma_{ms' p}$  - прочность неармированного материала матрицы при растяжении;

в) зависимости физико-механических соотношений материалов компонентов. Например, правило подбора материала волокна по известному материалу матрицы:  $\sigma_{уд.матр.} < \sigma_{уд.волокна}$ , где  $\sigma_{уд.матр}$  и  $\sigma_{уд.волокна}$  - удельные прочности матрицы и волокна;

г) зависимости, отражающие технологические процессы создания композитов и оказывающие влияние на их проектирование.

## 2.2. Выполнение правил комбинирования

Стадией, предшествующей численному проектированию и подбору компонентов КМ, является обзор научно-технической литературы, который выполняется как анализ известного материала в области КМ. Одновременно происходит перевод данных литературных, справочных источников и технического задания в магматическое описание (математическую модель), отражающую изменение и строение совокупности использованных в описании параметров во времени, поле температуры и среды.

### 2.2.1. Конкретизация объектов проектирования

Проектирование КМ проводится по критериям (ограничениям) полученной при создании совокупной характеристики условий работы изделия. Во-первых, по готовым чертежам и проектной конструкторской документации на технический объект (автомобиль, самолет и пр.) определяют тип конкретной детали, оцени-

вая ее форму, например: ОБОЛОЧКА (лист, цилиндр, профиль); ТЕЛО ВРАЩЕНИЯ (шестерня, вал, кулачок); БАЛКА (стержень, панель, монолит), и устанавливают назначение детали. Во-вторых, определяют габариты изделия и степень развитости формы (число переходов, сопрягаемых поверхностей и их вид). На этом этапе происходит предварительное рассмотрение и назначение способа и технологии получения изделия из композита. В-третьих, устанавливают схему главных напряжений и характер и вид механического нагружения (циклические, статические, динамические, изгиба, кручения); находят критическое (опасное) сечение и тензор напряжений. В-четвертых, устанавливают условия эксплуатации (температура, среда, требования к поверхности изделия - факторы эрозии и коррозии, светостойкости, трения). На каждом этапе полученные данные математически формализуются, что приводит к созданию общей математической модели композита. В начале проектирования КМ механические свойства материала полагают изотропными. Критерии прочности для оценки работоспособности конструкций рассмотрены в курсе "Сопротивление материалов".

### **2.2.2. Ограничения при проектировании композитов**

Проектирование КМ ограничено конструкторской и технологической возможностями. Под конструкторской возможностью понимают способность данной формы детали, структуры и совокупности выбранных компонентов удовлетворять требованиям к изделию (ТЗ). Под технологической возможностью понимают наличие техники и технологии, позволяющих получить спроектированный материал. Все это отражается в проектировании новых композитов.

#### **ПРИМЕР**

Дано: одноосное растяжение стержня массой  $m = 0,1$  кг, длиной  $L = 0,45$  м, сечением  $S = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, силой  $N = 80$  кН, при температуре 570 К. Определим расчетную плотность проектируемого КМ по формуле:

$$\gamma^{\max} = \frac{m}{V} = \frac{m}{SL} = \frac{0.1}{0,4510^{-4}} = 2222 \text{ кг} / \text{м}^3$$

Определим нижнее значение расчетной плотности проектируемого КМ для пористости 9%:

$$\gamma^{\min} = \gamma^{\max} - \frac{\gamma^{\max}}{100\%} 9\% = 2022 \text{ кг} / \text{м}^3$$

Определим расчетное напряжение растяжения в стержне:

$$[\sigma^p] = \frac{N}{S} = \frac{80000}{10^{-4}} = 8 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 800 \text{ МПа}$$

Определим верхнее и нижнее значение удельной прочности проектируемого КМ:

$$\sigma_{y\partial}^{\min} = \frac{\sigma^p}{\gamma^{\max}} = \frac{800}{2222} = 0,360 \text{ МДж} / \text{кг}$$

$$\sigma_{y\partial}^{\max} = \frac{\sigma^p}{\gamma^{\min}} = \frac{800}{2022} = 0,396 \text{ МДж} / \text{кг}$$

Таким образом, плотность проектируемого КМ должна находиться в диапазоне от 2022 до 2222 кг/м<sup>3</sup>, а удельная прочность - в диапазоне от 0,360 до 0,396 МДж/кг.

## 2.3. Стадии проектирования композитов

Под давлением технико-экономических причин, главная из которых расширение сырьевой базы машиностроения, осуществляют проектирование новых материалов, большей частью КМ. Проектирование КМ осуществляют последовательным выполнением следующих стадий.

### 2.3.1. Выбор, разработка структуры и рецептуры материала

Первая стадия проектирования КМ в начале своего выполнения подразумевает ориентировочный выбор метода получения композита без конкретизации технологических параметров. В первую очередь ориентировочно выбирают способ формообразования композита. Его легко определить, так как каждый способ ограничен в своих возможностях формой, размерами, точностью (допусками) и качеством получаемой поверхности. Кроме того, действующий технологический критерий сужает область выбора компонентов композита, особенно матрицы, по пластическим свойствам. Происходит назначение температурного интервала формообразования. Поскольку каждому виду формообразования присуща своя специфика анизотропии свойств, например ориентации волокон, осуществляется выбор структуры композита. Для всех вариантов задания способом формования стержня является горячее экструдирование. Энергетические затраты при экструзии КМ с металлической матрицей в  $1,5 \cdot 1,7$  раза больше, чем у КМ с полимерной матрицей и составляет 2 МДж/кг.

### **2.3.2. Выбор матричного материала КМ**

Здесь конструкционные требования создают ограничения, которые рассматриваются в последовательности;

- ограничения по плотности изделия (веса конструкции);
- ограничения по удельным прочностным и упругим характеристикам;
- ограничения по прочности, жесткости и долговечности;
- ограничения по поверхностным свойствам изделия;
- ограничения по времени эксплуатации изделия;
- ограничения по рабочей температуре изделия;
- ограничения по стоимости.

Расчетным образом определяют материал матрицы и альтернативные варианты, проводят первую конкретизацию способа получения изделия и ориентировочный экономический расчет. Выбирают наиболее приемлемые варианты матери-

ала матрицы и технологий. В настоящее время специалисты материаловеды и конструкторы КМ при поиске материалов используют справочные информационные системы ЭВМ и INTERNET. В настоящей работе используются данные приведенные в справочных таблицах. Алгоритм поиска, приведенный выше, может быть дополнен другими ограничениями. В ходе выбора матричного материала возможны два случая:

1. известные материалы без армирования не отвечают конструкционным критериям. Здесь происходит переход к композиту;
2. известные материалы для матриц удовлетворяют требованиям и конструкционной и технологической возможности. В данном случае проектирование КМ не прерывают, а рассматривают варианты менее прочных (жестких) и более дешевых матричных материалов. Например, если была выбрана матрица из пластической массы, то появляется возможность ввести наполнители (мел, бумажные отходы и т.п.), что сказывается положительно на себестоимости изделия. Применение дешевых армирующих элементов (стальной проволоки, стеклянных нитей, волокон и тканей) в композите – аналоге матричного материала в данном случае достаточное условие для выполнения требований по конструкторским и технологическим ограничениям.

## **ПРИМЕР**

При выборе матричного материала КМ по такому параметру, как плотность учитывают аддитивное правило:

$$\gamma^{KM} = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f)$$

где  $\gamma^{KM}$ ,  $\gamma_m$  и  $\gamma_f$  - плотности КМ, волокна и матрицы,  $V_f$ - объемная доля волокна. Можно выбрать тяжелую матрицу и легкие волокна, можно - наоборот и получить требуемый композит.

Выбираем из табл. 1 два наиболее близких по плотности материала:

Фторопласт Ф  $\gamma = 2150 \text{ кг/м}^3$  и алюминиевый сплав АК - 4  $\gamma = 2750 \text{ кг/м}^3$ . Энергетические затраты на изготовление примерно одинаковы. Рабочая температура Ф составляет 560 К, а АК-4 600 К, что близко к значениям ТЗ.

Рассчитываем их удельную прочность, подставляя численные значения получаем:  $\sigma_{AK-4} = 0,177 \text{ МДж/кг}$ ;  $\sigma_{Ф} = 0,016 \text{ МДж/кг}$ . Расчетная удельная прочность выбранных материалов ниже требуемого значения. Возникает необходимость в армировании матрицы.

Таблица 1

### Свойства матричных компонентов композиционных материалов

Материал	Плотность, $\gamma \text{ кг/м}^3$	Прочность, $\sigma_b \text{ МПа}$	Рабочая температура $T, ^\circ\text{C}$	Удельные энергетические затраты на изготовление материала, кДж/кг
АД-1	2700	410	660	180
АК-4	2650	430	600	200
АЛ-1	2750	470	560	210
В-95	2800	600	470	300
ПТЭ-1 (Ti)	4700	1650	500	250
Бериллий	1300	1360	500	240
НП-2 (Ni)	8900	450	1100	540
ХН70Ю	7800	750	1400	600
Полистирол	950	40	300	160
ЭД-10	1160	35	370	180
Фенилон	1350	120	400	200
Полиэтилен	1050	35	320	220
Фторопласт Ф	2150	35	560	120
СП90-3 (Fe-C)	7800	700	400	300

### 2.3.3. Выбор армирующего материала КМ

Первым используется ограничение по типу армирующего элемента (непрерывные волокна, пленки, ткани и т.п.) Они продиктованы формой, геометрией изделия и схемой напряженного состояния. Число альтернативных вариантов уменьшает правило: ориентация структурных элементов арматуры КМ (схема армирования) должна строго соответствовать направлениям сил (схеме) внешнего механического нагружения. Практический опыт показывает, что крупногабаритные изделия, исключая длинномерные, типа непологих оболочек, корпусов, сосудов, инерционных накопителей принято изготавливать из непрерывных волокон укладкой или намоткой лент, нитей, тканей, жгутов. Для повышения жесткости такие изделия комбинируют со стержнями и каркасами. Изделия малых геометрических размеров типа тел вращения и монолитов принято армировать дискретными волокнами, фольгами, пленками.

Дальнейший выбор арматуры ограничен:

- 1) рабочим температурным интервалом эксплуатации изделий;
- 2) термодинамической и термокинетической совместимостью компонентов, типом межкомпонентной связи. Ограничения по гетерофазности и наличие как минимума механической связи и максимума, как проявление сил смачивания или слабой растворимости компонентов в заданном температурном интервале эксплуатации и изготовления КМ, позволяет выбрать химический состав арматуры, конкретизировать данные о температуре и продолжительности операций, связанных с нагревом, или горячей обработке давлением.

В настоящее время принято матрицы из пластмасс армировать стеклянными, органическими и углеродными волокнами, матрицы из металлов и их сплавов - керамическими, углеродными и металлическими волокнами.

#### **ПРИМЕР**

Из табл. 2. выбираем для матрицы АК-4 керамические волокна из  $Al_2O_3$  диаметром 501 мкм, так как они обладают минимальными энергетическими затра-

тами на их изготовление. Для матрицы из фторопласта - углеродные волокна ВМН диаметром 6 мкм;

3) удельной прочностью. Если удельная прочность волокон ниже удельной прочности матрицы, тогда упрочнения КМ не наступает. Здесь переходят к другому волокну или матричному материалу с подходящими характеристиками удельной прочности. Кроме того, учитывают тип арматуры и возможность переработки армирующих полуфабрикатов непосредственно в упрочняющую фазу и анализируют поведение арматуры в процессе формования.

### ПРИМЕР

Проверим выполнение условия удельной прочности. Для матрицы из фторопласта и волокон ВМН:

$$\sigma_{\phi} = 0,016 < \sigma_{ВМН} = \frac{1470}{1700} = 0,865 \text{ МДж / кг}$$

$$\sigma_{АК-4} = 0,170 < \sigma_{АL_2O_3} = \frac{4140}{3960} = 1,045 \text{ МДж / кг}$$

Условие удельной прочности выполняется.

### ПРИМЕР

Определим критическую длину волокна. Критическая длина волокна - это длина, при которой наступает упрочнение при введении арматуры в матрицу. В то же время это минимальная длина волокна, в которую допускается переработка исходного сырья арматуры, например непрерывной нити. Она рассчитывается по формуле:

$$L_{кр} = \frac{d_f \sigma_{\phi f}}{2\tau_{\phi p}}$$

где  $L_{кр}$  - критическая длина дискретного волокна;  $d_f$  - диаметр волокна;  $\sigma_{\phi f}$  - прочность при растяжении волокна;  $\tau_{\phi p}$  - прочность границы "волокно - матрица". Для ужесточения расчета  $L_{кр}$  предполагаем, что разрушение матрицы происходит от сдвиговых напряжении, определяющих прочность границы:

$$\tau_{\phi p} = \sigma_m \cos(45^\circ); \sigma_{ВМН(АК-4)}=430 \text{ МПа, получаем: } \tau_{Гр(АК-4)}= 304 \text{ МПа; } \sigma_{ВМН(\Phi)}=35$$

МПа, получаем  $\tau_{гр(\Phi)} = 25$  МПа. Подставляя численные значения, рассчитываем

$L_{кр}$ :

$$L_{кр}(Al_2O_3) = \frac{501 \cdot 3960}{2 \cdot 304} = 3263 \text{ мкм}$$

$$L_{кр}(ВМН) = \frac{6 \cdot 2210}{2 \cdot 25} = 265 \text{ мкм}$$

Более короткие волокна являются предпочтительными при изготовлении композитов методом горячей экструзии, но они дорогие.

Таблица 2

Свойства армирующих компонентов композиционных материалов

Материал	Диаметр волокна, $d_f$ мкм	Плотность, $\gamma$ кг/м <sup>3</sup>	Прочность, $\sigma_B$ МПа	Рабочая температура Т, К	Удельные энергетические затраты на из- готовление ма- териала W, кДж/кг
<b>КЕРАМИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА</b>					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	127	3960	2410	1300	950
	280		3400	1300	950
	501		4140	1400	1000
TiC	280	4910	1540	1500	1380
<b>СТАЛЬНЫЕ ВОЛОКНА</b>					
Ст. 35	140	7700	3150	600	1200
	220		3100		1160
	400		3000		1140
	800		2950		1120
	1000		2800		1100
09X13H13 М	40	7800	3600	700	1300
	90		3400		1250
	120		3000		1220
	1170		3100		1180
<b>СТЕКЛЯННЫЕ ВОЛОКНА</b>					
СВ	6	2580	1250	400	600
	7		1950		590
	10		3500		580
	20		5000		500
<b>ОРГАНИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА</b>					

ОВ	10	1430	2500	420	350
Оксалон	15	1450	2950	420	400
УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА					
ВМН	6	1700	2210	2200	1146
	7		1470		1440
	9		1143		1400

#### 2.4. Разработка рецептуры композиционного материала

Поиск концентрационных соотношений (рецептуры) КМ возможен по двум вариантам:

- с использованием расчета прочности КМ по свойствам компонентов;
- с применением расчета упругих констант КМ по свойствам компонентов.

Поиск концентрации компонентов сводится к проведению обратных вычислений  $F_f$  по зависимостям, связывающим аддитивное свойство КМ со свойствами отдельных компонентов через их доли, концентрацию арматуры.

Например, уравнение для определения прочности композита с непрерывными волокнами:

$$\sigma_{вкм} = \sigma_{вф} V_f + \frac{\sigma_{вм}}{1 - V_f}$$

Уравнение для расчета модуля Юнга дискретного КМ

$$E = E_m \left( 1 + V_f \cdot n \frac{L_{кр}}{d_f} \right) \cdot (1 - nV_f)$$

где 
$$n = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{L_{кр}}{d_f}}$$

где  $E_f, E_m$ - модули Юнга волокна и матрицы.

Из формул выражают концентрацию волокон, подставляют численные значения, тем самым определяют рецептуру КМ.

#### **ПРИМЕР**

Прочность композита армированного дискретными волокнами с учетом конце-

вых эффектов арматуры оценивается выражением :

$$\sigma_{\epsilon \text{ КМ}} = (L_{\text{кр}} \frac{\tau_{\text{сп}}}{d_f}) V_f + \sigma_{\text{вт}} (1 - V_f) \quad (\text{А}).$$

Найдем из него концентрацию волокон  $V_f$ . Получаем:

$$V_f = \frac{\sigma_{\epsilon \text{ КМ}} - \sigma_{\text{вт}}}{\frac{L_{\text{кр}} \cdot \tau_{\text{сп}}}{d_f} - \sigma_{\text{вт}}} \quad (\text{Б}).$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$V_f(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{800 - 430}{\frac{3263 \cdot 304}{501} - 430} = 0,21(\text{доля})$$

$$V_f(\text{ВМН}) = \frac{800 - 35}{\frac{265 \cdot 25}{6} - 35} = 0,71(\text{доля})$$

В некоторых случаях решения формулы (Б), например, при  $L_{\text{кр}}/d_f < 1$  и учете пористости значения  $V_f$  получаются больше единицы, кроме того,  $V_f$  ограничена возможностями методов смешивания и формообразования. Так концентрация, возможная при экструзии механической смеси, не превышает 0,7. В таких случаях изменяют или  $L_{\text{кр}}$  или  $d_f$  принимая  $V_f$  равной значениям ТЗ или технологии, а также учитывают ограничения диаметра и длины волокон, например,  $d_f$  ограничена толщиной экструдированного изделия. Диаметр волокна  $d_f$  должен быть в 100 раз меньше диаметра экструдированного стержня. Кроме того, применение  $V_f < 0,05$  в КМ экономически и технологически неэффективно, и объемная доля арматуры не превышает 0,75.

Для этих случаев целесообразно выразить из формулы (А)  $L_{\text{кр}}$  и продолжить расчет концентрации  $V_f$  новой критической длиной волокна. **ПРИМЕР**

Принимаем для КМ Ф+ВМН решение изменить  $L_{\text{кр}}$  при сохранении всех остальных параметров и концентрации  $V_f = 0,21$ :

$$L_{кр}(ВМН) = \frac{([\sigma] - \sigma_{см} + \sigma_{см} V_f) d_f}{\tau_{сп} V_f} = \frac{([800] - 35 + 35 \cdot 0,21) \cdot 6}{25 \cdot 0,21} = 882 \text{ мкм}$$

Проводим уточнение выбора компонентов и рецептуры проектируемых КМ по удельным энергетическим затратам на изготовление материалов их образующих.

Рассчитываем общие энергетические затраты:

$$W_{км} = W_f V_f + W_m (1 - V_f)$$

где  $W_m$  и  $W_f$  - удельные энергетические затраты на изготовление матричного и волоконного компонентов, (см. справочные табл. 1 и 2) Подставляя численные значения, получаем:

$$W_{км}(AK_{-4} + Al_2O_3) = 1000 \cdot 0,21 + 200(1 - 0,21) = 368 \text{ кДж / кг}$$

$$W_{км}(\Phi + ВМН) = 1460 \cdot 0,21 + 120(1 - 0,21) = 401 \text{ кДж / кг}$$

## 2.5. Разработка рациональной конструкции изделия из композита

Эта стадия производится с целью учета требований к форме детали, возникших на этапе проектирования структуры, свойств и состава КМ. В случае, если заменяется устаревший материала на композит с лучшими характеристиками, в чертеж вводят требуемые изменения, например сопряжения и конусность для технологичности формообразования прессованием; припуски на механическую обработку и радиуса кромок при литьевом способе; в чертеж проставляются новые базовые поверхности. Если в чертеж уже заложен КМ, эта стадия уже выполнена.

## 2.6. Уточнение стадий проектирования композиционного материала

На этом этапе происходит повторный расчет по всем указанным этапам с использованием вновь полученных данных и, главное, проверяется соблюдение условий и требований, заложенных в техническом задании.

## ПРИМЕР

Определим плотность КМ для каждого проектируемого варианта по формуле:

$$G_{км} = G_f V_f + G_m (1 - V_f),$$

где  $G$  - плотность КМ и компонентов. Подставив численные значения? получаем:

$$G_{км} (AK - 4 + Al_2 O_3) = 3960 \cdot 0,21 + 2700 \cdot (1 - 0,21) = 2965 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$G_{км} (\Phi + ВМН) = 1700 \cdot 0,21 + 2150 \cdot (1 - 0,21) = 2055 \text{ кг} / \text{м}^3$$

Для материала КМ(АК-4 +  $Al_2O_3$ ) не выдерживается ограничение по плотности, а для  $\Phi + ВМН$ ) расчетная величина плотности входит в интервал плотности (см. выше).

Проводим расчеты удельных энергетических затрат на изготовление стержня по двум вариантам проектируемого КМ, учитывая, что энергетические затраты при экструдировании КМ с металлическими матрицами в 1,5 ... 1,7 раза больше, чем для полимерных КМ. Применяем формулу

$$W_{(к\text{м}об\text{щ}е\text{е})} = W_{км} + W_{\text{экструдирование}},$$

где  $W_{км}$  (общее)- общие энергетические затраты на изготовление детали;  $W_m$  - энергетические затраты КМ из выбранных компонентов;  $W_{\text{экструдирование}}$  - энергетические затраты процесса экструдирования. Подставляя численные значения получаем:

$$W_{к\text{м}об\text{щ}е\text{е}}(AK - 4 + Al_2 O_3) = 2000 + 1,5 \cdot 368 = 2552 \text{ кДж} / \text{кг}$$

$$W_{к\text{м}об\text{щ}е\text{е}}(\Phi + ВМН) = 2000 + 401 = 2401 \text{ кДж} / \text{кг}$$

Видно, что общие удельные энергетические затраты на изготовление КМ с полимерной матрицей ниже, чем у металлического КМ.

Рассчитываем удельные прочности двух вариантов КМ (формула приведена выше):

$$\sigma(AK - 4 + Al_2O_3)_{уд} = \frac{800}{2965} = 0,27 \text{ МДж / кг}$$

$$\sigma(\Phi + ВМН)_{уд} = \frac{800}{2055} = 0,39 \text{ МДж / кг}$$

## ВЫВОД

Расчет удельной прочности показывает, что для КМ  $\Phi$ +ВМН выполняется ограничение по интервалу ТЗ удельной прочности.

Таким образом, для изготовления стержня необходимо выбрать матрицу из фторопласта, арматуру на углеродных волокон, диаметром 6 мкм и длиной 882 мкм с концентрацией 0,21.

### 3. Типовые задания к расчетной работе

№	Масса, кг	Сила, кН	№	Масса, кг	Сила, кН
1	0,10	80	12	0,13	90
2	0,12	120	13	0,14	120
3	0,36	90	14	0,10	НО
4	0,23	110	15	0,32	75
5	0,34	70	16	0,40	110
6	0,40	56	17	0,37	180
7	0,15	89	18	0,10	190
8	0,31	180	19	0,31	150
9	0,28	130	20	0,29	170
10	0,37	70	21	0,25	110
11	0,11	65	22	0,21	90

#### Основная литература

1. Черкес, З.А. Композиционные и неметаллические конструкционные материалы. Наноматериалы: учеб. пособие / З. А. Черкес; ТулГУ. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. — 178 с. ISBN 978-5-7679-1709-9. – 51 экз.

2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технологии: учеб. пособие для вузов / Кербер М.Л. [и др.]; под общ. ред. А.А.Берлина. — СПб.: Профессия, 2008. — 560 с. - ISBN 978-5-93913-130-8. — 5 экз.
3. Фомичева, Н.Б. Композиционные материалы: учебное пособие / Н. Б. Фомичева, Г. В. Сержантова; ТулГУ. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2013. — 130 с. — ISBN 978-5-7679-2629-9. - 15 экз.

#### Дополнительная литература

1. [Волков, Г. М.](#) [Материаловедение: учебник для вузов / Г. М. Волков, В. М. Зуев.](#) — 2-е изд., перераб. — Москва: Академия, 2012. — ISBN 978-5-7695-8087-1 - 50 экз.
2. Технология конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): в 4-х ч. / под общ. ред. Э.М. Соколова; С.А. Васина; Г.Г. Дубенского. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.
- Ч.1: Машиностроительные материалы : учебник для вузов / Е. В. Гринберг, Г. В. Маркова, В. А. Алферов.- 2007. — 475 с. - ISBN 978-5-7679-1056-4 — 21 экз.
3. [Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях: учеб.-справ. руководство / В. А. Струк \[и др.\].](#) — Долгопрудный: Интеллект, 2010. — 536 с. ISBN 978-5-91559-068-6 — 55 экз.
4. [Ржевская, С. В.](#) [Материаловедение: учебник для вузов / С. В. Ржевская.](#) — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Логос, 2006. — 424 с. - ISBN 5-98704-149-X — 3 экз.
5. [Технические свойства полимерных материалов: учебно-справочное пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская: под общ. ред. В.К. Крыжановского.](#) — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Профессия, 2005. — 248 с. - ISBN 5-93913-093-3 — 7 экз.
6. [Фомичева Н.Б.](#) [Неметаллические материалы: учебное пособие/ Фомичева Н.Б., Сержантова Г.В., Маркова Е.В.;](#) - ТулГУ. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2011. — 223 с. — ISBN 978-5-7679-1907-9 2 экз.

7. Колпаков, А.Г. Композиционные материалы и элементы конструкций с начальными напряжениями : монография / А. Г. Колпаков.— Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. — 254 с. — ISBN 978-5-7692-0952-9. – 2 экз.

#### Периодические издания

1. Перспективные материалы / РАН; Минобразования РФ. - М.: Интерконтакт Наука, – *На рус. яз.* - Выходит 6 раз в год (до 2012 г.).- Россия - ISSN 1028-978X

2. Вопросы материаловедения: Научно-технический журнал / ЦНИИКМ. — СПб.: Прометей, *На рус. яз.* - Выходит 4 раза в год (до 2012 г.).- Россия - ежеквартально. - ISSN 0132-4535.

3. Проблемы прочности: международный научно-технический журнал / Институт проблем прочности НАН Украины – Киев. *На рус. яз.*- Выходит 6 раз в год. – Россия - ISSN 0556-171X.

4. Материаловедение: научно-технический и производственный журнал - М.: ООО "Наука и технологии", *На рус. яз.* - Выходит 12 раз в год.- Россия - ежемесячно .— ISSN 1684-579X.