

# Второй отборочный этап

## Индивидуальная часть

### Основы композитных технологий

#### *Задача П.1.1.1. (2 балла)*

Чем в большей степени определяется прочность волокнистых ПКМ?

1. Свойствами волокон.
2. В равной степени свойствами волокон и матрицы.
3. Свойствами матрицы.

#### *Решение*

Задача волокнистого наполнителя в композиционном материале — воспринимать основную нагрузку композита. Зачастую в качестве матрицы выступают хрупкие материалы, такие как пластик или керамика, и как для снижения хрупкости, так и для повышения несущей способности материала используют гораздо более прочные и жесткие волокна на основе углерода, стекла, арамида. Например, при изгибе пластины из углепластика, именно волокна, натягиваясь, не дают разрушиться материалу, и именно они определяют прочность волокнистых ПКМ.

**Ответ:** 1.

#### *Задача П.1.1.2. (2 балла)*

Какой армирующий наполнитель имеет наибольшую прочность?

1. Углеродное волокно.
2. Арамидное волокно.
3. Базальтовое волокно.
4. Стекловолоконное волокно.

#### *Решение*

Среди самых распространенных волокнистых наполнителей наибольшей прочностью обладают именно арамидные волокна. Их удельная прочность превосходит не только указанные армирующие наполнители, но и большинство металлов.

**Ответ:** 2.

## Полимерные связующие

### Задача II.1.2.1. (4 балла)

Какое состояние характерно для матрицы при температуре выше температуры стеклования полимерного композиционного материала?

1. Жидкое.
2. Высокоэластическое.
3. Вязкотекучее.
4. Упругое.

#### Решение

Для полимеров при температуре выше, чем температура стеклования, характерно высокоэластичное состояние, главным признаком которого является способность к значительным обратимым деформациям под воздействием небольших внешних сил. Это объясняется высокоэнергетичными колебаниями молекул, что приводит к разрыву связей между отдельными полимерными цепями, но при этом молекулярные нити остаются связанными.

Ответ: 2.

### Задача II.1.2.2. (4 балла)

В двух цилиндрических емкостях находится одинаковое количество связующего. Диаметр 1-й емкости равен  $d = 50$  мм, высота  $h = 50$ . Диаметр 2-й емкости равен  $d = 100$ , высота  $h = 15$  мм. В какой емкости быстрее произойдет отверждение связующего?

1. Во 2-й емкости.
2. В 1-й емкости.
3. Одинаково.

#### Решение

В 1-й емкости. Реакция отверждения — экзотермическая с выделением тепла. При отверждении будет происходить саморазогрев связующего и ускорение полимеризации. Величина саморазогрева зависит от высоты столба жидкости, и т. к. в 1-й емкости столб жидкости выше, в ней и отвердится быстрее связующее.

Ответ: 2.

### Задача II.1.2.3. (4 балла)

В емкость со связующим бросили стальной шар диаметром  $d = 10$  мм. Скорость падения шара в связующем  $V = 30$  мм/с. Определить вязкость связующего. Плот-

ность связующего  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ .

1. 0,12 Па·с.
2. 120 Па·с.
3. 12 Па·с.
4. 1,2 Па·с.

### *Решение*

Определим вязкость связующего по методу Стокса:

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{\text{шара}} - \rho_{\text{смола}}) \cdot R^2 \cdot g}{9 \cdot V}$$

Таким образом, вязкость связующего равна:

$$\eta = \frac{2 \cdot (7800 - 1200)5^2 \cdot 9.8}{9 \cdot 30 \cdot 1000} = 12 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Ответ: 3.

## Производство и технологии композитов

### *Задача II.1.3.1. (2 балла)*

Назовите технологию для массового производства П-образного профиля из стеклопластика длиной до 6 метров.

### *Решение*

Пултрузия — технология, позволяющая получать профили разного сечения с практически неограниченной длины, в том числе из композиционных материалов. Иные технологии производства композитных конструкций либо менее массовые (вакуумная инфузия, RTM, автоклавное формование), либо не позволяют изготавливать П-образные профили (намотка).

Ответ: Пултрузия.

### *Задача II.1.3.2. (4 балла)*

Предложите материал для изготовления технологической оснастки рефлектора зеркальной космической антенны из углепластика (оснастка должна иметь стабильность размеров в диапазоне температур  $20 - 140^\circ\text{C}$ ). Рефлектор работает на частоте 60 ГГц.

1. Алюминий.
2. Углепластик.

3. Сталь.
4. Стеклопластик.

### *Решение*

Рефлекторы зеркальных космических антенн, работающие на больших частотах, должны обладать очень высоким значением размеростабильности, т. е. они должны сохранять расчетный профиль и размеры независимо от внешних условий. При производстве таких рефлекторов используются смолы горячего отверждения, т. е. полимеризация происходит в печах. Для того чтобы в процессе нагрева будущая конструкция не поменяла свои линейные размеры, необходимо использовать углепластик в качестве материала оснастки, т. к. он имеет минимальное значение коэффициента линейного термического расширения.

**Ответ:** 2.

### *Задача II.1.3.3. (6 баллов)*

Опишите последовательность действий при изготовлении изделия из ПКМ с применением технологии Flex molding.

1. Подготовка формообразующей оснастки.
2. Установка силиконового мешка.
3. Нанесение антиадгезионного состава на рабочую поверхность оснастки.
4. Механическая обработка изделия.
5. Полимеризация связующего.
6. Укладка армирующего наполнителя на оснастку.
7. Приготовление связующего.
8. Проверка герметичности собранной оснастки.
9. Распалубка оснастки.
10. Пропитка армирующего наполнителя.
11. Дегазация связующего.

### *Решение*

Технология Flex molding является модификацией технологии вакуумной инфузии, только вместо одноразовой вакуумной пленки используется многоразовый силиконовый мешок. В связи с этим последовательность действий практически не отличается от технологии вакуумной инфузии и имеет следующий вид:

1. Подготовка формообразующей оснастки.
2. Нанесение антиадгезионного состава на рабочую поверхность оснастки.
3. Укладка армирующего наполнителя на оснастку.
4. Установка силиконового мешка.
5. Проверка герметичности собранной оснастки.
6. Подготовка связующего.
7. Дегазация связующего.

8. Пропитка армирующего наполнителя.
9. Полимеризация связующего.
10. Распалубка оснастки.
11. Механическая обработка изделия.

Ответ: 1; 3; 6; 2; 8; 7; 11; 10; 5; 9; 4.

#### **Задача II.1.3.4. (4 балла)**

Какой технологический метод изготовления позволяет реализовать максимальные показатели физико-механических свойств полимерного композиционного материала?

1. Намотка.
2. Вакуумная инфузия.
3. Прессование.
4. RTM.

#### **Решение**

Использование волокнистых наполнителей в композитных конструкциях сопряжено со значительной анизотропией характеристик материала, когда прочность, жесткость и другие свойства значительно отличаются в разных направлениях. В случае слоистых композитов направление армирования материала продиктовано направлениями нагрузок в конструкции, в которой при одних нагрузках работают одни слои, а при других — иные. Все это приводит к тому, что часть слоев «бездействует», а значит физико-механические свойства не реализуются в полном объеме. Своего рода исключением являются композиты, изготовленные по технологии намотки. Такой технологией производят, в частности, баллоны высокого давления. В силу особенностей напряженно-деформированного состояния баллонов, независимо от направления армирования волокон они сопротивляются нагрузке, а значит весь армирующий компонент работает при нагружении. Соответственно, реализуются максимальные показатели физико-механических свойств.

Ответ: 1.

#### **Задача II.1.3.5. (4 балла)**

Рассчитать время изготовления кольца из стеклопластика методом намотки. Толщина кольца  $h = 5$  мм, ширина кольца  $b = 10$  мм. Объемное содержание волокна в композите  $j = 65\%$ . Частота вращения оправки  $N = 10$  об/мин. Линейная плотность жгута  $\lambda = 1800$  г/км. Плотность стеклянного волокна  $\rho = 2,6$  г/см<sup>3</sup>.

1. 2,1 мин.
2. 15 мин.
3. 4,7 мин.
4. 47 мин.

**Решение**

Площадь поперечного сечения кольца равна:

$$S_K = b \cdot h = 50 \text{ мм}^2 \quad (\text{II.1.1})$$

Если объемное содержание волокна в композите  $j = 65\%$ , то площадь поперечного сечения  $S_{\text{Ж}}$  непропитанного жгута в изделии равна:

$$S_{\text{Ж}} = \frac{j \cdot S_K}{100} = 0.65 \cdot 500 = 32,5 \text{ мм}^2 \quad (\text{II.1.2})$$

Число оборотов оправки, необходимое для получения кольца с площадью сечения  $S_{\text{ОБР}}$  равно:

$$n = \frac{S_{\text{Ж}}}{d} \quad (\text{II.1.3})$$

где  $d$  — площадь поперечного сечения единичного жгута.

Значение  $d$  рассчитывается из соотношения:

$$d = \frac{\lambda}{\rho} = \frac{1800}{2600} \quad (\text{II.1.4})$$

где  $\lambda$  — линейная плотность жгута,  $\rho$  — плотность волокна.

$$n = \frac{S_{\text{Ж}}}{d} = \frac{32,5}{0,69} \quad (\text{II.1.5})$$

Если частота вращения оправки  $N = 10$  об/мин, то время намотки  $t_H$  определяется как:

$$t_H = \frac{n}{N} = \frac{47}{10} = 4,7 \text{ мин} \quad (\text{II.1.6})$$

**Ответ:** 3.

**Структурные особенности композитов****Задача II.1.4.1. (6 баллов)**

Определить площадь поперечного сечения образца микропластика, если масса углеродного жгута длиной  $l = 100$  мм, из которого он изготовлен, равна  $m = 0,12$  г. Плотность углеродного волокна равна  $\rho = 1,8$  г/см<sup>3</sup>.

1. 6,7 мм<sup>2</sup>.
2. 1,5 мм<sup>2</sup>.
3. 0,67 мм<sup>2</sup>.
4. 0,15 мм<sup>2</sup>.

**Решение**

Рассчитаем линейную плотность жгута:

$$\lambda = \frac{m}{l} \quad (\text{II.1.7})$$

$$\lambda = \frac{0.12 \cdot 1000000}{100} = 1200 \text{ г/км}$$

Вычислим поперечное сечение жгута:

$$S = \frac{\lambda}{\rho} = \frac{1200}{100000 \cdot 1,8} = 0,67 \text{ мм}$$

**Ответ:** 3.

**Задача II.1.4.2. (6 баллов)**

От каких напряжений происходит расслоение образца в срединной части при трехточечном изгибе?

1. От касательных.
2. От нормальных.
3. От нормальных и касательных.

**Решение**

Разрушение от касательных напряжений сопровождается расслоением примерно в срединной части образца.

**Ответ:** 1.

**Задача II.1.4.3. (6 баллов)**

Каково назначение ашпрета, нанесенного на волокно?

1. Устранение краевых дефектов на поверхности волокна.
2. Защита волокна от трения в процессе переработки.
3. Создание прочной связи на границе волокно — связующее.

**Решение**

Ашпрет наносится на волокна для увеличения адгезионной связи между связующим и армирующим наполнителем.

**Ответ:** 3.

### Задача II.1.4.4. (6 баллов)

Вычислите объемное содержание армирующего наполнителя, матрицы и пор в квадратной пластине из углепластика. Пластина изготовлена из 6 слоев углеродной ткани. Масса пластины равна  $m_p = 5$  г. Масса пластины, измеренная в воде, равна  $m_B = 3$  г. Масса 1-го слоя углеродной ткани  $m_t = 0,4$  г. Плотность углеродного волокна  $\rho_u = 1,8$  г/см<sup>3</sup>. Плотность матрицы  $\rho_m = 1,2$  г/см<sup>3</sup>.

1.  $V_{\text{пор}} = 15\%$ ;  $V_{\text{ткани}} = 40\%$ ;  $V_{\text{матрицы}} = 45\%$ .
2.  $V_{\text{пор}} = 5\%$ ;  $V_{\text{ткани}} = 45\%$ ;  $V_{\text{матрицы}} = 50\%$ .
3.  $V_{\text{пор}} = 5\%$ ;  $V_{\text{ткани}} = 55\%$ ;  $V_{\text{матрицы}} = 40\%$ .
4.  $V_{\text{пор}} = 10\%$ ;  $V_{\text{ткани}} = 40\%$ ;  $V_{\text{матрицы}} = 50\%$ .

### Решение

Вычислить по формуле для метода гидростатического взвешивания (выводится по 2-му закону Ньютона) плотность пластины:

$$\rho_{\text{пл}} = \left( \frac{m_{\text{пл}}}{m_B} \right) \rho_{\text{воды}} = \left( \frac{5}{3} \right) \cdot 1 = 1,67 \text{ г/см}^3 \quad (\text{II.1.8})$$

Вычислить объем пластины:

$$V_{\text{пл}} = \frac{m_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}} = \frac{5}{1,67} = 2,99 \text{ см}^3 \quad (\text{II.1.9})$$

Вычислить объем армирующего наполнителя:

$$V_{\text{ткани}} = 6 \cdot \frac{m_m}{\rho_{\text{ув}}} = 6 \cdot \frac{0,4}{1,8} = 1,33 \text{ см}^3 \quad (\text{II.1.10})$$

Вычислить массу матрицы:

$$m_{\text{матр}} = m_{\text{пл}} - n \cdot m_m = 5 - 6 \cdot 0,4 = 1,8 \text{ г} \quad (\text{II.1.11})$$

Вычислить объем матрицы:

$$V_{\text{матр}} \frac{m_{\text{матр}}}{\rho_{\text{матр}}} = \frac{1,8}{1,2} \quad (\text{II.1.12})$$

Вычислить объем пор:

$$V_{\text{пор}} = V_{\text{пл}} - V_{\text{матр}} - V_{\text{ткани}} = 2,99 - 1,5 - 1,33 = 0,16 \quad (\text{II.1.13})$$

Выразить объемное содержание пор, матрицы ткани в процентах и округлить

$$V_{\text{пор}} = \frac{0,16 \cdot 100}{2,99} = 5\% \quad (\text{II.1.14})$$

$$V_{\text{ткани}} = \frac{1,33 \cdot 100}{2,99} = 45\% \quad (\text{II.1.15})$$

$$V_{\text{матр}} = \frac{1,5 \cdot 100}{2,99} = 50\% \quad (\text{II.1.16})$$

**Ответ:** 2.

## Расчет прочности

### Задача II.1.5.1. (8 баллов)

Рассчитать прочность при разрушении от нормальных напряжений образца стеклопластика при трехточечном изгибе. Толщина образца  $h = 5$  мм, ширина образца  $b = 10$  мм, длина рабочей части образца  $l = 50$  мм. Нагрузка при разрушении:  $F = 1500$  Н.

1. 4500 МПа.
2. 45 МПа.
3. 4,5 МПа.
4. 450 МПа.

*Решение*

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot 1500 \cdot 50}{2 \cdot 10 \cdot 25} = 450 \text{ МПа}$$

Ответ: 4.

### Задача II.1.5.2. (8 баллов)

Рассчитать прочность при разрушении от касательных напряжений образца стеклопластика при трехточечном изгибе. Толщина образца  $h = 5$  мм, ширина образца  $b = 10$  мм. Нагрузка при разрушении:  $F = 1500$  Н.

1. 4500 МПа.
2. 4,5 МПа.
3. 450 МПа.
4. 45 МПа.

*Решение*

$$\sigma = \frac{3 \cdot P}{4 \cdot b \cdot h} = \frac{3 \cdot 1500}{2 \cdot 10 \cdot 5} = 45 \text{ МПа}$$

Ответ: 4.

### Задача II.1.5.3. (8 баллов)

По какой формуле производится расчет прочности при четырехточечном изгибе?

1.  $\frac{3Pl}{2bh^2}$ .

2.  $\frac{3P}{4bh}$ .
3.  $\frac{2Pl}{3bh^2}$ .
4.  $\frac{Pl}{bh^2}$ .

Ответ: 4.

#### Задача II.1.5.4. (8 баллов)

Вычислить прочность при растяжении образца в виде кольца из стеклопластика. Ширина кольца  $b = 10$  мм, толщина  $h = 5$  мм. Нагрузка при разрушении  $F_{max} = 50000$  Н.

1. 50 МПа.
2. 500 МПа.
3. 1000 МПа.
4. 100 МПа.

*Решение*

$$\sigma = \frac{F}{2 \cdot S} = \frac{50000}{2 \cdot 50} = 500 \text{ МПа}$$

Ответ: 2.

#### Задача II.1.5.5. (8 баллов)

По какой формуле производится расчет коэффициента реализации прочности в ПКМ?

1.  $K = \frac{\sigma_{composite}}{V_{fibre} \cdot \sigma_{fibre}}$
2.  $K = \frac{\sigma_{composite}}{\sigma_{fibre} \cdot V_{matrix}}$
3.  $K = \frac{\sigma_{fibre}}{\sigma_{composite} \cdot V_{matrix}}$
4.  $K = \frac{\sigma_{composite}}{V_{matrix} \cdot \sigma_{fibre}}$

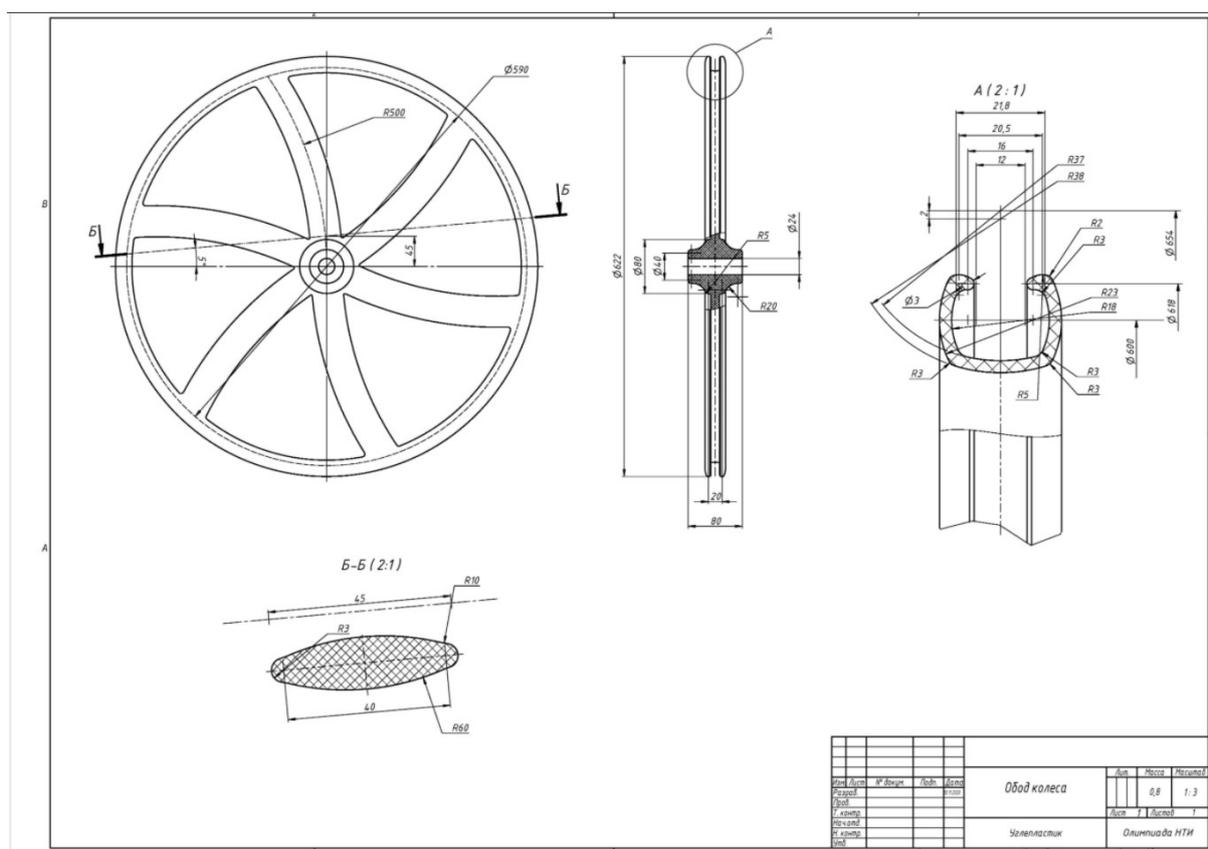
Ответ: 1.

# Командная часть

Командная задача второго этапа подразумевает коллективную работу всех троих участников.

Вам дан чертеж обода колеса, выполненного из углепластика. До конца второго этапа вам необходимо подготовить следующие данные:

1. Трехмерная модель колеса, выполненная в Autodesk Inventor (допускается использование любой версии).
2. Результаты конечно-элементного анализа конструкции колеса в Autodesk Inventor (внешний край колеса жестко закреплен, центральное отверстие нагружается силой в 1000 Н вдоль оси симметрии колеса).
3. Техпроцесс изготовления данного колеса. Должна быть схематично описана последовательность изготовления с указанием конкретной технологии (пример: Контактное формование. 1. Очистка оснастки ацетоном. 2. Нанесение разделительного состава и т. д.). Также необходимо описать применяемое оборудование и материалы, включая материал и характеристики оснастки (пример: Валик, кисть, стеклоткань, смола эпоксидная, оснастка односторонняя из МДФ).



Результаты необходимо предоставить в виде файла Microsoft Word (формат .doc или .docx). В данном файле должны содержаться ФИО участников, изображения разработанной трехмерной модели (не менее трех изображения в разных ракурсах), изображения с результатами конечно-элементного анализа и текст с технологическим процессом изготовления. Результаты загружайте по ссылке, приведенной ни-

---

же. Название файла должно совпадать с названием вашей команды. Не удаляйте, не перемещайте и не изменяйте файлы других команд, проявляйте уважение друг к другу. В случае изменения результатов команд другими участниками команды этих участников будут дисквалифицированы. <https://drive.google.com/drive/folders/10eb1fpbCB46XzQ0TMV6Gls9J7jSIFH5F?usp=sharing>