

# Анализ и выбор композиционного материала для вентиляторной лопасти

М.О. Чуковенкова, Д.С. Михалюк (АО “ЦИФРА”), Я.И. Поженько (АО “КАДФЕМ Си-Ай-Эс”)

Инженеры АО “ЦИФРА” и АО “КАДФЕМ Си-Ай-Эс” реализовали проект по подбору композиционного материала для вентиляторной лопасти с целью замены традиционно используемой стали. Этот вопрос актуален в отрасли проектирования лопаточных машин: турбин, компрессоров, вентиляторов, импеллеров и пропеллеров.

Одна из ключевых задач при замене материала лопасти – минимизация массы детали при удовлетворении прочностных ограничений в рамках заданных условий эксплуатации. Поскольку в импеллере имеется большое количество лопастей, это позволяет значительно уменьшить вес конструкции в целом.

Уменьшение массы конструкции и увеличение удельной прочности материалов, из которых она собрана, – важнейшие задачи, стоящие сегодня перед конструкторами и материаловедами. Целью минимизации массы является улучшение эксплуатационных характеристик конструкции и повышение экономической эффективности производства. Способом решения является применение для изготовления импеллеров композиционных материалов, которые по многим параметрам превосходят традиционные (сталь, алюминий). К числу преимуществ композитов можно отнести небольшой вес, высокую прочность и то, что они не подвержены коррозии. Вопрос о возможности замены ими традиционных материалов исследуется на протяжении многих лет, но до сих пор очень актуален.

В настоящее время на рынке доступно большое количество композиционных материалов, и чтобы определить, какие из них подходят для производства определенной конструкции, необходимо провести тщательную оценку и сопоставление их свойств. Задача эта является достаточно сложной, поскольку характеристики композитов не всегда представлены в открытых источниках; кроме того, немаловажным вопросом является оценка

стоимости материалов. Найти решение позволяет специальное программное обеспечение – например, **Ansys Granta Selector**; с его помощью инженеры АО “ЦИФРА” решили такую задачу для вентиляторной лопасти аэротрубы (рис. 1).

На рис. 2 показана САD-модель лопасти импеллера, для которой проводился отбор композиционных материалов.

Следует отметить, что выбор подходящего материала представляет собой комплексную задачу, которая требует привлечения специалистов разного профиля – материаловеда, конструкторов, экологов, экономистов, – поскольку необходимо учесть большое количество факторов (прочностные характеристики материала, условия эксплуатации конструкции, стоимость материала). Кроме того, надо принимать во внимание доступный способ работы с выбранным материалом и оценивать связанные с этим затраты.

## Первичный отбор

При выполнении данного проекта специалистами АО “ЦИФРА” были учтены все вышеперечисленные факторы. Критерии отбора определялись, исходя из основных требований к эксплуатационным характеристикам лопасти: вентилятор работает в среде с температурой, достигающей 80°C, а материал, из которого изготовлены его детали, должен обладать стойкостью к возгоранию.

Учитываясь при отборе и стоимость материала. В качестве верхней границы диапазона допустимых цен выбрана нижняя граница рыночной стоимости стали 20Л, цены на которую варьируются в диапазоне от 400 000 до 449 000 рублей за кубический метр, в зависимости от производителя.

На основе вышеперечисленных критериев был проведен отбор композиционных материалов в базе данных ПО **Ansys Granta Selector – MaterialUniverse** среди термопластичных и термоактивных композитов.

В результате первичного отбора получен следующий список композитов:

- полибутилтерефталат (PBT) с 50% содержанием стекловолокна;
- полибутилтерефталат (PBT) (50% длинного стекловолокна);
- полибутилтерефталат (PBT) (60% длинного стекловолокна);
- поликарбонат (PC) (20-30% длинного стекловолокна);
- поликарбонат (PC) (40% длинного стекловолокна);
- поликарбонат (PC) (50% длинного стекловолокна);



Рис. 1. Лопасти вентилятора аэротрубы и аэротруба



Рис. 2. САD-модель лопасти вентилятора

- полифениленсульфид (PPS) (65% стеклянных и минеральных волокон).

### Определение наиболее подходящего композита

Следующий шаг заключался в определении того, какой из отобранных материалов является наиболее эффективным для вентиляторной лопасти. Для этого надо было провести ранжирование кандидатов из полученного списка с учетом требований, предъявляемых к конструкции, накладываемых ограничений и целевых параметров для последующей оптимизации.

Основной механической характеристикой вентиляторной лопасти, влияющей на подбор материала, является способность выдерживать действующее на нее давление. В качестве целей выступают минимизация массы и стоимости, максимизация прочности и жесткости. Неизменными величинами являются габаритные размеры лопасти. Эти требования и ограничения формируют условия выбора материала.

В количественном выражении учесть вид и характер нагружения и поставленные цели позволяет специальная величина – **индекс эффективности**. Индексы эффективности представляют собой выражения, включающие в себя требования и ограничения для конкретного рассматриваемого случая нагружения детали.

Чтобы выразить индекс эффективности для конкретного случая, необходимо:

- задаться функцией и видом нагружения объекта (например, стержень, работающий на растяжение; балка, работающая на изгиб; колонна, работающая на сжатие);
- определить цель (минимальная стоимость, минимальный объем и др.);
- определить ограничения (например, габаритные размеры, жесткость и др.).

Для основных случаев индексы эффективности уже выведены и готовы к использованию [1].

Выразить индекс эффективности для лопасти можно, рассмотрев лопасть как пластину, работающую на изгиб.

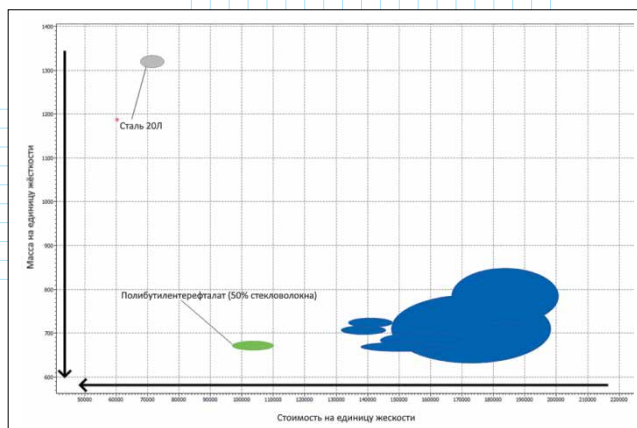
Индекс эффективности, определяющий стоимость за единицу жесткости, в случае работы пластины на изгиб вычисляется по формуле:

$$C_m \rho / \sqrt[3]{E_f}$$

где  $C_m$  – стоимость материала (руб/кг),  $\rho$  – плотность материала (кг/м<sup>3</sup>),  $E_f$  – модуль упругости при изгибе (ГПа).

**Табл. 1. Сравнительная таблица свойств материалов для лопасти**

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Сталь 20Л	7800	205	265	355
Композит PBT (50% стекловолокна)	1710	16,6	114	143



**Рис. 3. Результат ранжирования отобранных композитов по индексам эффективности**

Индекс эффективности, определяющий отношение массы и жесткости, в случае работы пластины на изгиб, вычисляется по формуле:

$$\rho / \sqrt[3]{E_f}$$

На рис. 3 показан результат ранжирования отобранных композитов в виде пузырьковой диаграммы Эшби. Поскольку характеристики одного и того же материала у разных производителей могут отличаться, на диаграмме материалы представлены овалами, которые и отображают разброс механических свойств для каждого материала. Чем ближе материал к левому нижнему углу диаграммы, тем более эффективным будет его применение для рассматриваемой конструкции.

В нашей задаче таким материалом оказался полибутилентерефталат с 50% содержанием стекловолокна – он обозначен на диаграмме зеленым цветом. Серый овал соответствует стали 20Л.

Сравнить физико-механические свойства стали 20Л и композита PBT (50% стекловолокна) помогает табл. 1.

### Проверка применимости расчетным способом

Для проверки применимости композита, выбранного в результате ранжирования отобранных композиционных материалов, был проведен расчет прочности лопасти под действием

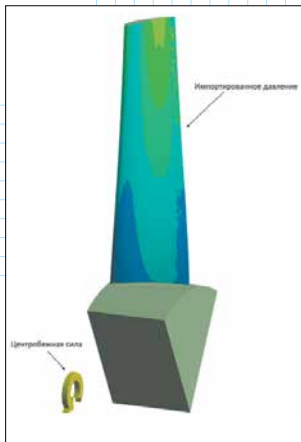


Рис. 4. Граничные условия

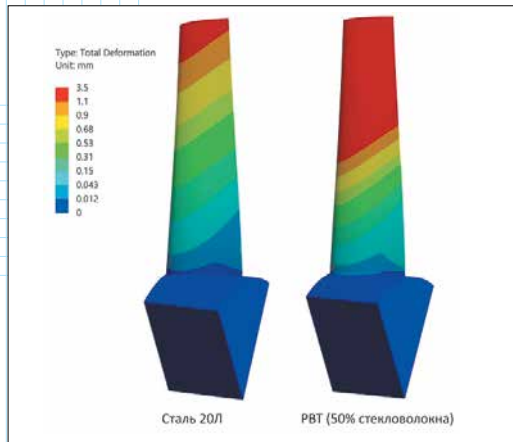


Рис. 5. Перемещения, возникающие в лопасти из стали 20Л и в лопасти из PBT (50% стекловолокна)

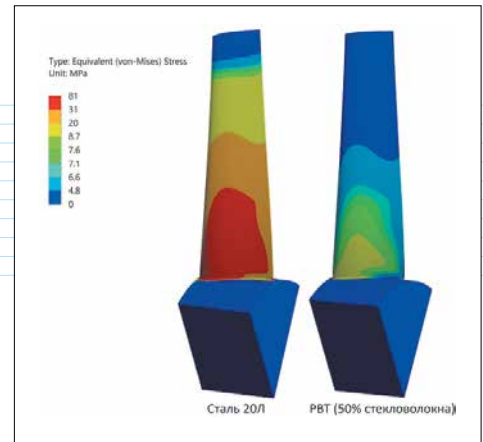


Рис. 6. Напряжения, возникающие в стальной лопасти и лопасти из PBT (50% стекловолокна)

давления. В качестве граничных условий задавалось распределение давления по поверхности лопасти, центробежная сила (количество оборотов в минуту равно 744). Поля распределенных нагрузок из выполненного CFD-расчета были переданы в виде табличных данных. Граничные условия приведены на рис. 4.

Сравнить перемещения, возникающие в лопасти, изготовленной из стали, и лопасти, изготовленной из выбранного в результате ранжирования композита PBT (50% стекловолокна), позволяет рис. 5. Как показал расчет, в лопасти из композиционного материала перемещения возросли в 2.5 раза – пропорционально уменьшению жесткости.

Напряжения, возникающие в стальной лопасти и лопасти, изготовленной из выбранного композита, показаны на рис. 6. Величина напряжений в лопасти из композита оказалась меньше,

поскольку основной вклад в напряженно-деформированное состояние вносит инерционная нагрузка, которая определяется величиной центробежной силы и плотностью материала. У композита PBT (50% наполнения стекловолокном) плотность в 4.5 раза ниже, чем у стали. Величина максимального напряжения, возникающего в лопасти из стали 20Л, равна 81 МПа и не превышает предела текучести для материала (265 МПа), а в лопасти из композита – 17 МПа (предел текучести – 114 МПа). Таким образом, минимальный коэффициент запаса для лопасти из композиционного материала составляет 6.7, тогда как для стальной лопасти – 3.3.

Диаграммы условно красного цвета на рис. 7 показывают изменение стоимости производства одной лопасти из PBT (50% стекловолокна) в зависимости от размера партии – для нижней и верхней границы цен на материал. Аналогичные диаграммы зеленого цвета построены для лопасти из стали 20Л.

В случае, когда размер партии составляет 80–120 штук, стоимость изготовления одной лопасти из сравниваемых материалов будет одинакова.

Таким образом, в результате проделанной работы инженерам АО «ЦИФРА» удалось выбрать композиционный материал, который соответствует всем требованиям, является наиболее эффективным с точки зрения стоимости производимых изделий и наиболее эффективным по массе и жесткости. Расчеты подтверждают, что прочность конструкции при этом является достаточной. 🍌

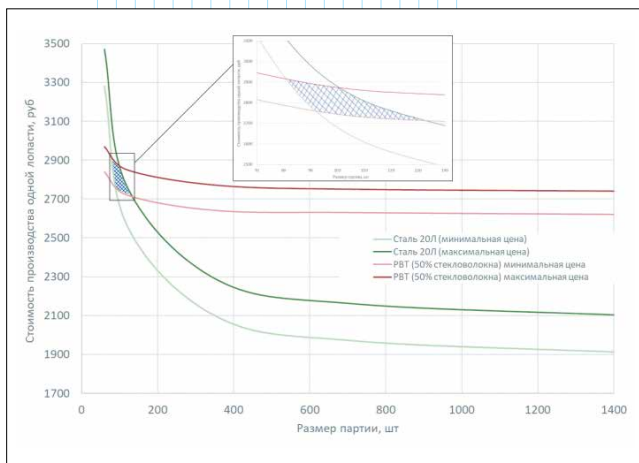


Рис. 7. Изменение стоимости производства лопасти из стали 20Л и PBT (50% стекловолокна) в зависимости от размера партии

### Литература

1. Ashby M. *Materials selection in mechanical design* (2<sup>nd</sup> edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.