

УДК 539.319:678.027.94

А.В. ГАЙДАЧУК, А.В. ЧЕСНОКОВ¹

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

¹Восточнoукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Украина

КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Приводится обзор исследований в области создания конструкций из композиционных материалов и поиска рациональных конструкторско-технологических решений. На основании анализа рынка армирующих материалов по соотношению стоимость - характеристики выявлены основные направления их применения. Исследование подходов к оптимизации конструкций из композиционных материалов выявило необходимость введения коэффициентов экономической эффективности конструкции. Для применения оптимизации с учетом экономической эффективности обоснована необходимость определения показателей массового совершенства и ценовой эффективности для различных видов изделий.

***Ключевые слова:** композиционный материал, экономическая эффективность, оптимизация, армирующий материал.*

Состояние проблемы

Прогресс науки и техники взаимосвязан с успехами в области создания новых материалов со специальными свойствами. После исчерпания возможностей совершенства однородных материалов (в частности металлов) основной прогресс в области материаловедения достигнут за счет развития композиционного материаловедения. Композиционные материалы (КМ) в первую очередь востребованы в областях, где на первый план выходит соотношение прочности (жесткости, термостойкости и т.д.) и массы конструкции, что и определяет ее эффективность. В связи с постоянным увеличением количества армирующих и матричных материалов, схем армирования и технологий производства создание конструкций из композиционных материалов становится задачей с постоянно увеличивающимся количеством факторов. Усложняющим и в то же время повышающим эффективность конструкций из КМ является объединение процессов создания материала и конструкции. Поиск рациональных конструкторско-технологических решений постоянно усложняется, что подчеркивает необходимость формализации подходов в принятии решений и переложить решение оптимизационных задач на вычислительную технику. Оптимизационные задачи, применительно к конструкциям КМ, успешно решаются в узкоспециальной постановке достаточно давно. Основное внимание уделялось совершенствованию конструкций авиакосмической техники и технологий ее изготовления. Центрами решения производственных проблем выступали специализированные институты, в которых сформировались научные школы [1]. Из них выделяются школы с историей от

начала промышленного применения КМ – это НАУ «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, НИИАТ, МАИ, МГТУ им. М.Э.Баумана и другие.

Увеличение объема производства волокон и композиционных материалов на их основе в сочетании с разработкой новых высокопроизводительных технологий, приводит к снижению их стоимости. Это открыло возможность использования армированных пластиков для изготовления высококачественного спортивного инвентаря. КМ уже успешно заменяют металлы в строительстве и других отраслях. На фоне постоянного увеличения стоимости ручного труда, энергии и традиционных материалов устойчивая тенденция к снижению стоимости КМ инициирует усилия разработчиков по внедрению их в изделия современной техники [2].

Целью исследований является определение критериев оптимизации конструкций из КМ с учетом экономической эффективности для расширения спектра их применения, снижения себестоимости за счет увеличения объемов производства КМ.

Анализ экономической обстановки

Сформировалось закрепление видов продукции и применяемых для их производства материалов. Для производства продукции общехозяйственного применения, корпусных деталей в автомобилестроении, судостроении и т.д. применяются стекловолокна. На рынке относительно недорогого стеклянного волокна преобладают производители из Китая, Тайваня и других стран Юго-Восточной Азии. Средняя стоимость стеклянного волокна с невысокими физико-механическими характеристиками приближенно составляет 1,2 евро/кг продук-

ции. Стекловолоконное с повышенными эксплуатационными характеристиками европейских и североамериканских производителей стоит несколько дороже - 1,4-1,6 евро/кг, для отдельных особо ответственных изделий – до 3,5 евро/кг. Снижение цен на стекловолокно на 20-25% в период 2001-2003 гг. было вызвано вводом в эксплуатацию крупных производств в Китае. По приближенным оценкам мировой объем рынка стекловолокна составляет 4-5 миллиарда евро в год [3]. В Украине производство стеклоармирующих материалов представлено ООО «НПО «Северодонецкий стеклопластик».

Ответственные дорогостоящие изделия (космической, авиационной и оборонной промышленности) и качественные спортивные товары изготавливают из специализированного волокна углеродного и арамидного. Стоимость указанных волокон, производимых на предприятиях Восточной Европы, составляет 11 евро/кг, Западной Европы и Японии – от 16 до 25 евро/кг [3]. За последние годы устойчиво прослеживается тенденция снижения цены на специализированные волокна при улучшении их качества. На украинском рынке специализированных волокон сформировалась сложная ситуация, отсутствие собственного производства вынуждает импортировать качественные армирующие материалы, стоимость которых достигает 250 евро/кг. В результате стоимость материалов на изготовление изделия достигает стоимости готового изделия в стране-импортере. В частности это характерно для изделий из высокомодульных углеродных волокон при сравнении себестоимости производства в Украине и Китае. Необходимость в освоении производства углеродных волокон в Украине обосновывалась ведущими учеными [4].

В некоторых ответственных конструкциях удается эффективно заменять углеродные и арамидные волокна базальтовыми. Развитие производства базальтовых волокон в Украине начато в 2004 году на предприятии ООО «Технобазальт-Инвест», которое является лидером в области производства непрерывного базальтового волокна и продуктов из него. Имеются публикации об эффективном применении базальтовых волокон для изделий ракетно-космической техники [5].

Не вызывает сомнений, что углеродное волокно имеет самые высокие механические характеристики, а Е-стекло - самую низкую цену. Очевидно также и то, что увеличение на 10% механических характеристик приводит к увеличению цены продукта отнюдь не на 10%. По данным [6] изменение прочности на 10% приводит к примерно 250 % увеличению цены. Покажем схему, отражающую взаимосвязь характеристик изделия и его стоимости, в частности веса и стоимости рис. 1.

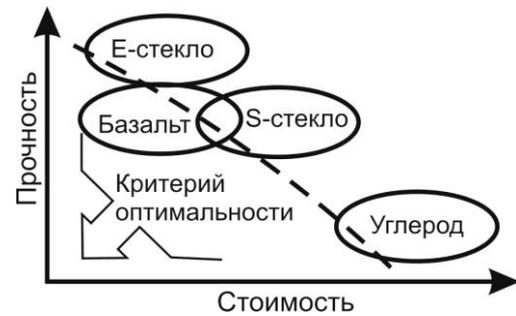


Рис. 1. Соотношение веса и стоимости изделия [6]

Базальт выделяется из приведенного тренда в силу специфики его производства, значительную долю (до 50%) занимают трудозатраты и энергозатраты. Именно поэтому данный продукт производится преимущественно в Украине и Китае, где стоимость рабочей силы несравнимо меньше, чем в Европейских странах и США, а также в России, где стоимость энергоносителей в разы меньше, чем в других развитых странах. Сопутствующим фактором является наличие сырьевой базы. Стоимость базальтового волокна составляет 2,4-3,4 евро/кг, что увеличивает эффективность его применения, рассматривая только соотношение цена – свойства и не принимая во внимание прочие преимущества базальта.

Анализ подходов к оптимизации конструкций из КМ

В.Л. Нарусберг и Г.А. Тетерс в работе [7] охарактеризовали оптимизацию конструкций из КМ как самостоятельное направление, базирующееся на классических подходах, но с более существенным влиянием технологических факторов их изготовления. Прикладное значение оптимизационных задач зависит от уровня достижений механики КМ. Изначально поиск оптимума конструкции был направлен на определение структуры армирования. В зависимости от назначения конструкции целевой функцией являлся максимум критической нагрузки, потери устойчивости, условие равнопрочности или минимизация веса. В основном поиск рациональных схем армирования велся варьированием одного структурного параметра. С развитием возможностей математического программирования поиск оптимизационных конструкций из КМ ведется варьированием геометрических и структурных параметров.

Для упрощения расчетов широко применяются принципы усреднения структурных параметров и методы конечных элементов. Для поиска оптимальных параметров недостаточно изученных процессов применяют теорию планирования многофакторных экспериментов.

Более сложной постановкой задачи является оптимизация безопасноповреждающихся конструкций по сравнению с задачей оптимизации конструкций на безопасный срок службы [8].

В качестве целевой функции при фиксированных прочностных параметрах выступают показатели экономичности – масса конструкции, стоимость материала и др. В известных работах нет критериев, отражающих оптимальное соотношение стоимости и веса конструкции. Для снижения веса конструкции применяются более дорогостоящие армирующие материалы, в результате чего стоимость конструкции увеличивается. Уже сложились определенные подходы к выбору армирующего материала, например, силовые конструкции ракетно-космической техники и военных самолетов изготавливают из углепластика. В качестве примера приведем V-22 Osprey (рис. 2, а), в котором 50 % конструкций выполнено из углепластика (3100 кг), конструкция Eurofighter Typhoon (рис. 2, б) имеет близкие показатели, в F-18 – меньше: 10,3% углепластика [9]. В конструкциях пассажирских самолетов в основном применяется стеклопластик.

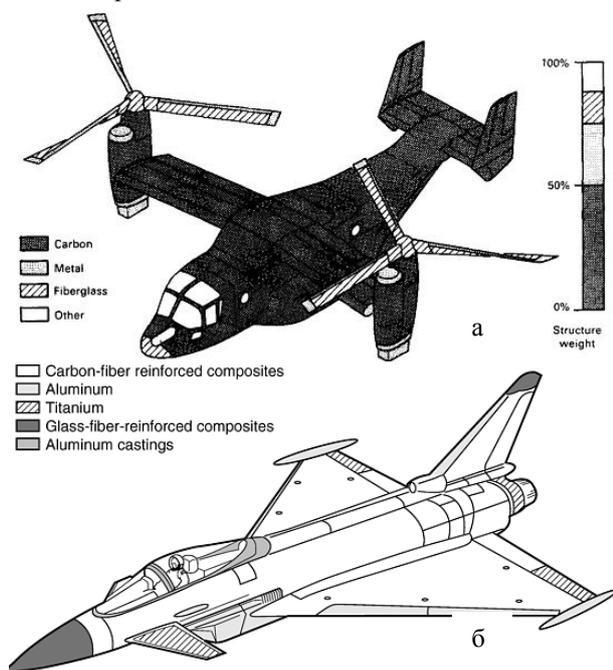


Рис. 2. Применение композиционных материалов в военной технике [9].

На рис. 3 показано увеличение веса композиционных материалов в конструкциях воздушных судов. По весу конструкций из КМ лидируют большие самолеты, вертолеты и истребители, конструкции которых и представляют наибольший интерес. Повышение стоимости конструкции при использовании более прочных и легких материалов окупается за счет экономии топлива и повышения грузоподъемности.

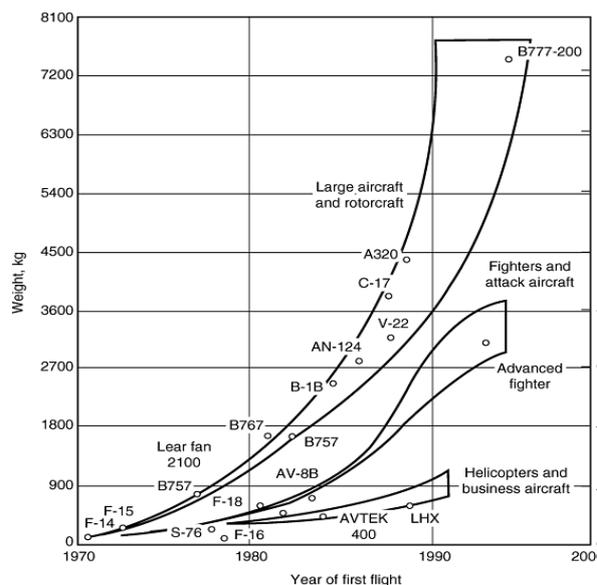


Рис. 3. Вес композиционных конструкций воздушных судов [9].

Показатели экономической эффективности снижения веса конструкции должны участвовать при решении оптимизационных задач. Выбирая материал необходимо учитывать тенденции к снижению стоимости армирующих материалов, что является актуальным, учитывая длительность проектирования и технологической подготовки производства воздушных судов.

Концепция оптимизации

Концепция оптимизации основных параметров конструкций авиакосмической техники из полимерных КМ, предложенная в работе [10, 11], охватывает все составляющие оптимизации проектных параметров. Недостаточное внимание выбору и экономическому обоснованию армирующих материалов может в дальнейшем отразиться на конкурентоспособности изделия по сравнению с аналогами.

Методы многокритериальной оптимизации условно можно разделить на две группы [12, 13]. Методы первой группы сводят многокритериальную задачу к однокритериальной путем свертывания векторного критерия в суперкритерий, который оптимизируется одним из методов однокритериальной оптимизации. Наиболее распространенным способом свертывания векторного критерия является линейная свертка вида:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i(x), \quad \alpha_i \geq 0,$$

где $\Phi(x)$ – суперкритерий, результирующий свертку;

α_i – коэффициенты относительной важности i -го критерия.

Ко второй группе можно отнести остальные методы многокритериальной оптимизации, которые не производят свертывание локальных критериев в скалярный суперкритерий. В работах [10, 14] выде-

лено три проблемы многокритериальной оптимизации.

Первая проблема связана с выбором принципа оптимальности, который строго определяет свойства оптимального решения и отвечает на вопрос, в каком смысле оптимальное решение превосходит все остальные допустимые решения. В отличие от задач однокритериальной оптимизации, у которых только один принцип оптимальности $f(x^0) \geq f(x)$, в данном случае имеется большое количество различных принципов, каждый из которых может приводить к выбору различных оптимальных решений. Это объясняется тем, что приходится сравнивать векторы эффективности на основе некоторой схемы компромисса. В [15] отмечено, что наиболее часто используют принцип оптимальности по Парето.

Вторая проблема связана с нормализацией векторного критерия эффективности. Она вызвана тем, что очень часто локальные критерии, являющиеся компонентами вектора эффективности, имеют различные масштабы измерения, что и затрудняет их сравнение, поэтому приходится приводить критерии к единому масштабу измерения, т. е. нормализовать их одним из существующих способов [16].

Третья проблема связана с учетом приоритета локальных критериев. При выборе решения стараются добиться наивысшего качества по всем критериям, однако степень совершенства по каждому из них имеет различную значимость. Для учета приоритета вводится вектор распределения важности критериев, с помощью которого корректируется принцип оптимальности.

Применительно к методам оптимизации первой группы существуют различные способы выбора коэффициентов относительной важности α_j . В [17] рассматриваются около 20 методов выбора α_j для различных способов построения функционала $\Phi(x)$. Значение α_j для функции $F_j(x)$, отражающей экономическую эффективность конструкции, может быть определено по показателям аналогичных моделей с учетом тенденций изменения требований и стоимости материалов. Функция экономической эффективности может быть определена массивом отношений веса конструкции к ее стоимости при равных физико-механических характеристиках в зависимости от применяемых материалов, конструктивных решений и т.д.

Аналогичный подход может быть применен и при использовании второй группы методов многокритериальной оптимизации. При этом функция экономической эффективности будет дополнять используемый набор оптимизируемых функций с учетом нормализации векторного критерия приведения и иметь определенное значение в векторе распределения важности критериев.

Учитывая, что многие технологии и подходы к расчету и оптимизации конструкций, разработанные для авиационной техники, находят применение в других отраслях народного хозяйства, применяемые

в них критерии и подходы должны иметь возможность трансформироваться в зависимости от оптимизируемого изделия. Применение предложенной концепции оптимизации при изменении требований экономической эффективности к оптимизируемому объекту изменит базовый показатель экономической эффективности конструкции или будет иметь другое значение критерия в векторе важности при использовании второй группы методов оптимизации.

Примером введения показателей ценовой эффективности, связавших стоимость изделия, вес и эксплуатационные характеристики, является работа [18], в которой на примере баллонов высокого давления проведено сравнение влияния применяемых армирующих материалов на конкурентоспособность изделия.

Выводы

Концепции оптимизации конструкций из КМ должны учитывать параметры экономической эффективности с учетом тенденций снижения стоимости армирующих материалов.

Необходимо разработать показатели массового совершенства и ценовой эффективности для различных изделий и определить их значения.

Повышение объемов применения КМ в конструкциях способно стимулировать развитие производства отечественных армирующих материалов и снижение их стоимости.

Литература

1. Гайдачук В.С. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів / В.С. Гайдачук, О.В. Гайдачук, Я.С. Карпов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – Вып. 2(69). – С.12 – 19.
2. Chung Deborah D.L. *Composite Materials: Science and Applications 2nd Edition*. – N.Y. : Springer, 2010. – 349 p.
3. Жуковский С. В. *Формирование товарно-рыночной стратегии предприятия в условиях структурной перестройки промышленности* : Дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 : Москва, 2004. 160 с.
4. Вишняков Л. Р. *Тенденции развития производства углеродных материалов на основе ПАН-волокон* / Л. Р. Вишняков, В. И. Цариковский // *Композиционные материалы в промышленности* : материалы Двадцать восьмой междунар. конф., 26–30 мая 2008 г., г. г. Ялта – Киев. – С. 197–200.
5. Потапов А. М. *Композиционный материал на основе базальтовых волокон для изделий ракетно-космической техники* / А. М. Потапов, В. А. Коваленко, В. Д. Прилепов // *Композиционные материалы в промышленности* : материалы Двадцать седьмой междунар. конф., 26 мая – 30 мая 2008 г., г. г. Ялта – Киев. – С. 136–137.

6. Базальтовое волокно: Техничко-економический анализ <http://www.b-composites.net/50.html>.
7. Нарусберг В.Л. Устойчивость и оптимизация оболочек из композитов / В.Л. Нарусберг, Г.А. Тетерс – Рига : Зинатне, 1988. – 299 с.
8. Бакулин В.Н. Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций: монография. В 2-х томах. Том 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов // В.Н. Бакулин, В.Г. Марков, Е.Л. Гусев. Физматлит, 2008. – 256 с.
9. ASM Handbook Volume 21 Composite. ASM, 2001. – 2605 p.
10. Кондратьев А.В. Концепция оптимизации основных параметров конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов / А.В. Кондратьев // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2010. – № 5 (72). – С. 13-18.
11. Гагауз Ф.М. Научное обеспечение проектирования и производства конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2 / Ф.М. Гагауз, А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 1 (65). – Х., 2011. – С. 7–19.
12. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты. М.: Наука, 1989. – С. 116-123.
13. Шоробура Н.Н. Решение задач многокритериальной оптимизации сложных объектов и систем [Электронный ресурс] / ДонНТУ. Факультет КИТА Режим доступа – http://masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf
14. Уланов Г. М. Методы разработки интегрированных АСУ промышленными предприятиями / Г.М. Уланов, Р.А. Алиев, В.П. Кривошеев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
15. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. М.: Наука, 1982. – 256 с.
16. Хоменюк В.В. Элементы теории многокритериальной оптимизации / В.В. Хоменюк. М.: Наука, 1983. – 127 с.
17. Анохин А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев / А.М. Анохин, В.А. Глотов, В.В. Павельев, А.М. Черкашин // *Автоматика и телемеханика*, №8, 1997. – С. 3-35.
18. Ивановский В.С. Композитный баллон рациональной ценовой эффективности / В.С. Ивановский // *Композиционные материалы в промышленности: материалы Двадцать восьмой междунар. конф., 26–30 мая 2008 г., г. Ялта – Киев*. – С. 336.

Поступила в редакцию .03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков.

КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

О.В. Гайдачук, О.В. Чесноков

Наводиться огляд досліджень у галузі створення конструкцій з композитів і пошуку раціональних конструкторсько-технологічних рішень. На підставі аналізу ринку армуючих матеріалів за співвідношенням вартість - характеристики виявлено основні напрями їхнього застосування. Дослідження підходів до оптимізації конструкцій з композиційних матеріалів виявило необхідність введення коефіцієнтів економічної ефективності конструкцій. Для застосування оптимізації з урахуванням економічної ефективності обґрунтовано необхідність визначення показників масової досконалості та цінової ефективності для різних видів виробів.

Ключові слова: композиційний матеріал, економічна ефективність, оптимізація, армуючий матеріал.

CONCEPTION OF OPTIMIZATION OF APPLICATION OF COMPOSITION MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT ECONOMIC EFFICIENCY

A.V. Gaydachuk, A.V. Chesnokov

A review over of researches is brought in area of creation of constructions from composition materials and search rational design-engineering decisions. On the basis of market of reinforcing materials analysis on correlation a cost is descriptions, basic directions of their application are exposed. Research of going near optimization of constructions from composition materials exposed the necessity of introduction of coefficients of economic efficiency of construction. For application of optimization taking into account economic efficiency the necessity of determination of indexes of mass perfection and price efficiency is grounded for the different types of wares.

Key words: composition material, economic efficiency, optimization, reinforcing material.

Гайдачук Александр Витальевич – д-р техн. наук, профессор, проректор, зав. кафедры ракетных двигателей Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков, Украина.

Чесноков Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина, e-mail: chesnokov@snu.edu.ua.