

УДК 629.735

*Тараненко И. М.*

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Украина, г. Харьков

**КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ПРОДОЛЬНОГО СИЛОВОГО НАБОРА КОНСТРУКЦИЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ КОМПОЗИТОВ**

*Рассмотрен подход к проведению квалиметрической выбора и оценки функциональности форм поперечного сечения деталей продольного силового набора из композитов для конструкций летательных аппаратов. Для проведения исследований использовались современные методы квалиметрического анализа. Результатами исследования являются количественные показатели свойств поперечных сечений профилей. Основными выводами работы являются разработка сравнительной шкалы показателей свойств типовых поперечных сечений профилей, использующихся в авиационной промышленности, получение комплексного показателя свойств, включающего как параметр несущей способности профилей, так и технологические параметры их производства.*

*Ключевые слова:* квалитетический анализ; продольный силовой набор; композиционные материалы; летательные аппараты; технология изготовления; несущая способность.

## Введение

В современной аэрокосмической технике широко используются детали из композиционных материалов (КМ), выполненных на основе армирующих волокон и полимерных смол. Они незаменимы при изготовлении малоразмерных летательных аппаратов (ЛА) разного назначения. В настоящее время наметилась тенденция крупносерийного производства таких объектов. До недавнего времени в таких конструкциях элементы разного назначения и исполнения изготавливались, в основном, с применением технологий, присущих индивидуальному и мелкосерийному производству. Серийное и крупносерийное производство требуют минимизации трудозатрат на изготовление изделий. Их существенное снижение достигается повышением технологичности конструкций при сохранении заданного уровня несущей способности и эксплуатационных свойств изделия в целом. В терминах современной технологии это определяется как повышение качества конструкции.

## Анализ состояния проблемы

Для оценки качества той или иной конструкции используется квалитетический анализ, позволяющий количественно определить соотношение совокупности свойств, присущих разным конструкциям. Такая совокупность свойств представляет собой иерархическую структуру, которая включает в себя ряд групп комплексных свойств, в свою очередь состоящих из ряда более частных (мелких) свойств.

Для выполнения квалитетического анализа используется определенная последовательность действий. Она выглядит следующим образом: оценивание ситуации → определение решений → генерация показателей качества (ПК) → определение их коэффициентов весомости (КВ) → определение взаимодействий → синтез алгоритма комплексного ПК → проверка надежности алгоритма.

В данной работе для широко используемых деталей продольного силового набора из композитов (стрингеры, лонжероны) выполнен квалитетический анализ некоторых конструктивно-технологических решений.

## Анализ литературы и основных достижений по теме

Известно использование методов квалитетрии в сельском хозяйстве [1], для процессов прокатки [2], листовой штамповки [3] и других отраслях народного хозяйства.

## Цель работы

Целью работы является квалитетическая оценка форм поперечного сечения деталей продольного силового набора из композитов для конструкций летательных аппаратов.

## Постановка проблемы

В настоящее время выбор формы поперечного сечения деталей продольного силового набора ЛА, в основном, проводится исходя из условий обеспечения требуемой несущей способности, собираемости, функционального назначения агрегата без учета их технологичности. Разделение этого комплексного свойства на частные компоненты позволяет количественно обосновать выбор вариантов сечений профилей.

## Методы исследования

Для достижения поставленной цели используются методы квалитетического анализа [1-4].

## Основная часть

В современных конструкциях малоразмерных летательных аппаратов широко используются элементы силового набора, поперечные сечения которых показаны на рис. 1 [5]. Они служат как отдельными деталями, так и элементами интегральных конструкций несущих элементов ЛА. Структура таких элементов (схема армирования волокнами) в общем случае сложная и зависит от функционального назначения элемента. Точность размеров наружных поверхностей таких значительно выше точности размеров внутренних поверхностей. На концах продольных деталей зачастую устанавливают трансверсальные крепежные элементы (болты, штифты, специальные крепежные шайбы и др.) для обеспечения соединения с окружающими конструкциями. Толщины стенок и полок таких элементов могут быть различными.

Подобные элементы изготавливаются несколькими способами [6, 7]:

- выкладкой по оправке;
- намоткой по оправке с соблюдением необходимой структуры материала. Получение профилей незамкнутого контура (см. рис. 1, а, б) предусматривает последующую продольное разрезание профиля типа в с последующей механообработкой кромок (по необходимости). Изготовление профилей двухзначной кривизны более сложно: предвари-

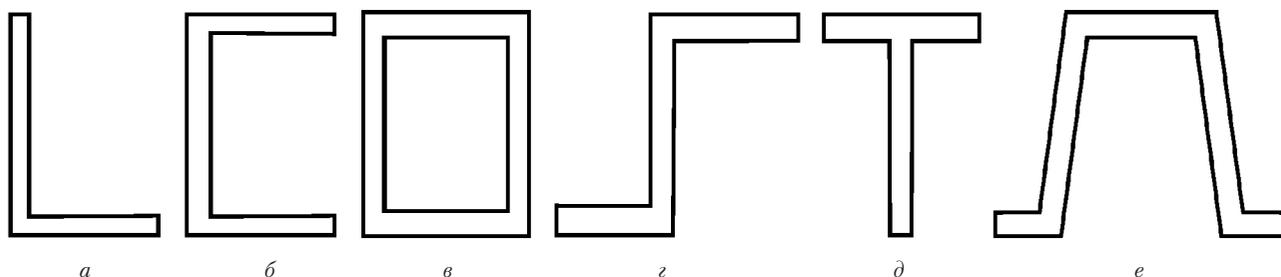


Рис. 1. Характерные сечения продольных элементов:  
а, б, в – однозначной кривизны; з, д, е – двузначной кривизны

тельно наматывается соответствующий замкнутый профиль в полусухом (недозаполимеризованном) состоянии, затем он разрезается и его края формируются соответствующей дополнительной оправкой, окончательно проводится полимеризация на двух и более оправках;

- получение профилей методом сложного объемного ткачества [8] с последующей пропиткой и полимеризацией. Известны примеры использования такой технологии, но она требует очень сложного и дорогого ткацкого оборудования.

Методы пултрузии и ролтрузии применяются ограниченно, так как обеспечивают получение только однонаправленной структуры детали.

Можно представить комбинированный метод, по которому методом пултрузии получают тонкостенную форму профиля, являющуюся формозадающим элементом, а затем методом выкладки создают на полках и стенках требуемую структуру материала. Этот комбинированный метод может повысить производительность труда за счет высокой производительности пултрузионных процессов и возможности применения автоматизированных

процессов выкладки относительно коротких и узких участков на стенках и полках пултрузированного профиля. При этом упрощается возможность установки на концах профилей трансверсальных соединительных элементов.

Методы выкладки («сухой», «полусухой», «мокрой») даже с использованием автоматизированных машин достаточно затратные по времени, требуют применения технологической оснастки и специальных приспособлений.

Методы намотки более производительны, в большинстве случаев позволяют получать заданную структуру материала детали. Используются методы «сухой» намотки с последующей пропиткой и «мокрой» намотки. «Сухая» намотка не обладает высокой надежностью равномерной пропитки полимеризируемым составом. При «мокрой» намотке на концах наматываемой детали при смене направления движения наматываемых волокон образуются утолщения слоя намотки (рис. 2).

Такое утолщение может достигать двух-трехкратного увеличения заданной толщины намотки. В последующем такие утолщенные участки обрезают, что увеличивает расход наматываемого материала, время намотки и может привести к снижению несущей способности изделия, так как путь передачи нагрузки через волокна прерывается. Использование различных обжимных приспособлений не обеспечивает равномерное объемное содержание волокон в материале. Тем не менее метод намотки в настоящее время представляется наиболее предпочтительным для большой номенклатурной группы профилей.

Из известного набора свойств машиностроительной продукции [3, 4] для качественного анализа деталей фактически одинакового функционального назначения можно остановиться на рассмотрении таких присущих им свойств как технологичность и уровень технологической наследственности. Здесь под технологичностью принимается свойство, позволяющее изготавливать детали заданной программы выпуска, надлежа-

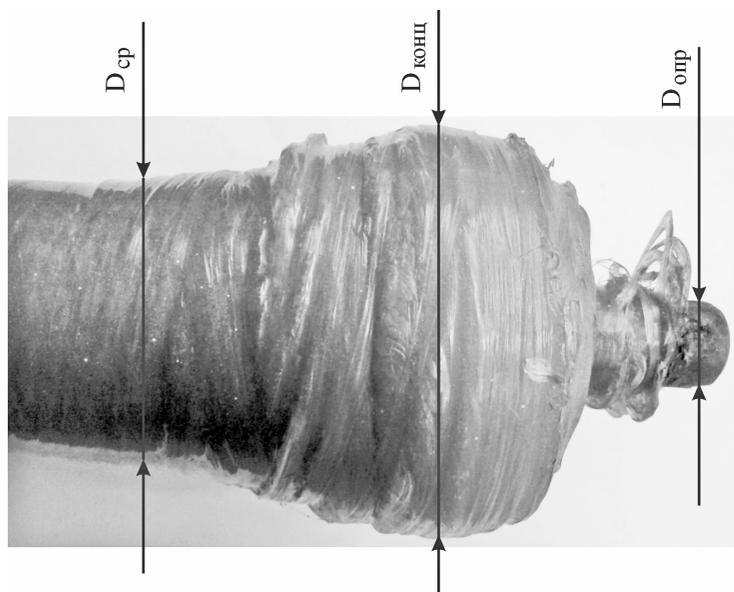


Рис. 2. Характерные утолщения наматываемого слоя на концах оправки:  
 $D_{ср} = 45$  мм,  $D_{конец} = 45$  мм,  $D_{опр} = 20$  мм, длина утолщенной части ~65 мм

щего качества, с минимальной технологической себестоимостью на конкретном предприятии. Технологичность конструкции профиля, в свою очередь, является комплексным свойством, состоящим из более частных свойств. А именно:

- технологическая возможность изготовления;
- габаритные размеры детали по длине;
- прямолинейность продольной оси детали;
- постоянство формы сечения по длине;
- сложность формы сечения;
- сложность структуры материала на отдельных его участках;
- длительность формообразования;
- длительность технологической подготовки производства;
- коэффициент использования материала;
- возможность изготовления соединительных элементов.

Весомость этих свойств для разных условий может быть разной.

Вредная технологическая наследственность определяется величиной коробления профиля (скручиванием профиля по длине и перемещением сечения в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Это явление является результатом разности коэффициентов термического расширения и усадки различных участков сечения профиля [5-8].

Оценим актуальность и достаточность приведенного перечня свойств, характеризующих потребительские свойства профилей из КМ.

Основным функциональным назначением таких деталей является восприятие и перераспределение потока нагрузки. Параметром, определяющим это

свойство является его несущая способность, которая может оцениваться по прочности, жесткости и потере устойчивости (общей и местной). В большинстве реальных конструкций сам профиль из КМ работает совместно с несущей оболочкой (обшивкой), но для целей квалитетического анализа можно в первом приближении исключить влияние оболочки.

Для количественной оценки этого свойства можно рассмотреть два подхода:

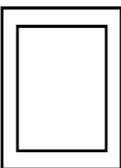
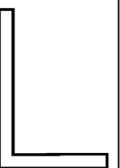
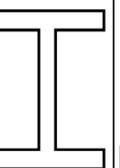
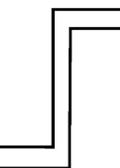
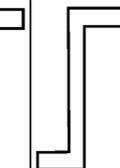
- задать определенное значение несущей способности оболочки с подкрепленными профильными элементами. По этому параметру установить необходимый шаг и размеры подкрепляющих элементов разных форм сечения. Размеры этих сечений будут разными, а их форма определит сложность изготовления. Исходя из этого, следует оценить количественный показатель конкретной формы сечения;
- рассмотреть определенный набор форм сечений таких элементов с одинаковыми размерами и рассчитать их несущую способность.

С позиций механики нагружения более строг первый подход, но он требует достаточно сложных расчетов и дополнительных исходных данных. Второй подход более прост и в первом приближении можно остановиться на нем.

Сравнительные значения несущей способности приведены в табл. 1. Анализировались 6 форм поперечных сечений профилей одинаковой высоты, ширины и толщины стенок и полок одно- и двухзначной кривизны наружной поверхности [9, 13]. Для установления шкалы параметра несущей способности необходимо выбрать нулевую точку, в качестве

Таблица 1

**Сравнение несущей способности вариантов профилей и отношение площадей поперечного сечения профиля и описанного круга**

Параметр	Варианты профилей и их размеры: высота 50 мм, ширина 20 мм, толщина стенки 2 мм, длина 1 м, угол армирования – 0°					
						
Несущая способность, кН	93	74	43	208	74	85
Отношение площади поперечного сечения профиля к площади описанного круга	0,116	0,075	0,060	0,056	0,044	–
Отношение $N_{кр}/N_{кр}^0$	709	563	326	1588	563	647
Параметр $(N_{кр}/N_{кр}^0) \times 2000$	0,354	0,281	0,163	0,794	0,281	0,324

которой принята несущая способность пластинки шириной 20 мм и толщиной 2 мм  $N_{кр}^0 = 131,1Н$ . Такие размеры пластины аналогичны толщине и ширине рассматриваемых вариантов профилей и несущая способность такой пластины является минимальной. Для удобства анализа применено масштабирование параметров в 2000 раз. Так образована шкала параметра  $N_{кр}$ .

Из приведенных расчетов видно, что для каждой из двух групп сечений (с одно- и двухзначной кривизной) соблюдается последовательность — по мере уменьшения наполненности описанного круга площадь сечения профиля уменьшается несущая способность, что теоретически вполне объяснимо.

Профили второй группы (т.е. более сложные в изготовлении) обладают большей несущей способностью. Параметр  $(N_{кр}/N_{кр}^0) \times 2000$  выстраивается в последовательный ряд и шкалируется. Следовательно, его можно считать параметром несущей способности, который можно применять при квалитетическом анализе.

Прямолинейность оси детали вдоль длины и постоянство формы сечения вдоль этой оси во многом определяются конструктивными соображениями. Но стоимость изготовления технологической оснастки, усложнение процессов формообразования заданных формы и структуры материала при непрямолинейной оси и переменной форме и размерах поперечного сечения позволяют сделать следующий вывод: для повышения качества детали нужно стремиться к постоянству вышеназванных параметров. Количественно оценить потери из-за более низкого качества конструкции можно сравнив технологическую себестоимость вариантов.

Сложность практической реализации заданной структуры (углов армирования) применяемого материала количественно оценить достаточно непросто. Ясно, что процесс получения профиля с однонаправленным расположением волокон более простой, чем получение структуры с разнонаправленными волокнами, а тем более — структуры с трехмерным расположением волокон. В этом случае для квалитетической оценки необходимо использовать экспертный метод.

Для оценки длительности формообразования поверхности детали послойно воспользуемся имеющимися в литературе данными. Так в работах [10, 14] приведены зависимости времени выкладки одного слоя в виде квадратного корня из площади слоя или длины ленты, сложности формы поверхности и ряда эмпирических коэффициентов, зависящих от производственных условий.

Техпроцесс выкладки состоит из нескольких групп разнотипных операций, включающих, как правило, следующие операции:

1. Подготовка оснастки.
2. Нанесение разделительного слоя.

3. Выкладка заранее заготовленных слоев на формообразующую оснастку. В этой группе операций следует учесть длительность подготовки армирующего материала, связующего, пропитки армирующего материала и др.

4. Герметизация оснастки.

5. Установка прижимных элементов.

6. Полимеризация в автоклаве, печах или в условиях, не требующих нагрева, но, как правило, требующих приложения определенного давления. Уровень давления определяет значение объемного содержания волокон в материале, а, следовательно, уровень требуемых макросвойств.

7. Разборка оснастки и съем детали.

8. Удаление технологических припусков и обработка кромок детали.

Трудоемкость выкладки многослойного материала пропорциональна количеству слоев.

При изготовлении профилей сложной геометрии (например, двутавровых) этот перечень дополняется операцией склейки полуфабрикатов в окончательное изделие.

Изготовление профилей методом намотки предусматривает подготовку оснастки, непосредственно многослойную намотку, возможную установку продольного армирующего материала и возможную пропитку связующим.

Большинство комбинированных способов изготовления профилей включает в свою трудоемкость комбинацию перечисленных операций.

Принятые для анализа значения трудоемкости приведены в таблице 2.

Трудоемкость и длительность технологической подготовки производства профильных деталей определяются выбранным техпроцессом формообразования, планируемой программой выпуска (для учета необходимого количества технологической оснастки), заданной точности деталей, используемого материала (для коррекции оснастки) и ее стоимостью.

Приведенное отношение можно считать показателем трудоемкости формообразования профиля. Самое низкое значение (пропорциональное самой высокой трудоемкости) соответствует двутавровому профилю.

Длительность изготовления оснастки оценивалась следующим образом (табл. 3) [15].

Таким образом, удельный показатель некоторых свойств рассматриваемых вариантов профилей в совокупности выглядит следующим образом (табл. 4).

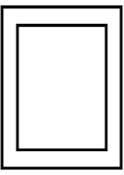
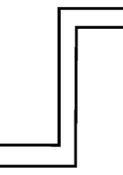
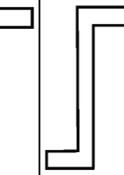
## Выводы

Полученные количественные значения позволяют сделать некоторые выводы.

1. Относительные значения трудоемкости формования и изготовления оснастки (указаны в строках 2 и 3 табл. 4) можно рассматривать как частные составляющие комплексного свойства — технологичности.

Таблица 2

Трудоёмкость формообразования вариантов профилей (минуты)

Операции	Варианты сечений профилей					
						
	Номер профиля					
	1	2	3	4	5	6
1. Подготовка оснастки	88	66	44	66	44	66
2. Нанесение разделительного слоя	4	3	2	3	2	4
3. Выкладка слоев (20 слоев)	38	24	24	38	42	54
4. Укладка и закрепление цулаг	8	6	2	6	4	10
5. Обрезка торцевых и продольных припусков, зачистка кромок детали	5	10	10	20	10	10
6. Разрезка заготовки на полуфабрикат	—	15	15	15	15	—
7. Сборка-разборка оснастки для склеивания. Склеивание полуфабрикатов	—	—	—	26	26	—
Итого, минут	143	124	97	174	143	144
Отношение трудоёмкости изготовления плоской пластины и профиля, $T_{пл} = 86$ мин	0,60	0,69	0,89	0,32	0,60	0,60

Примечание: Из общей трудоёмкости исключены компоненты трудоёмкости одинаковые для всех вариантов.

Таблица 3

Длительность изготовления оснастки (минуты)

Операции	Номер профиля					
	1	2	3	4	5	6
1. Изготовление прямоугольной заготовки из плиты	72	72	72	36	36	72
2. Черновое формообразование одной поверхности оснастки	—	24	48	24	24	72
3. Чистовая обработка поверхности оснастки	960	600	960	480	480	840
4. Сумма трудозатрат на изготовление формообразующей поверхности оснастки	1032	696	1080	540	540	984
5. Изготовление цулаг и прижимов	40	30	—	20	20	60
6. Итого на комплект оснастки	1072	726	1080	560	560	1044

Сравнительные значения количественных показателей свойств профильных деталей из КМ

Показатели	Номер профиля					
	1	2	3	4	5	6
1. Несущая способность	0,354	0,281	0,163	0,734	0,281	0,324
2. Трудоемкость изготовления	0,60	0,69	0,89	0,32	0,60	0,60
3. Трудоемкость изготовления оснастки	0,22	0,33	0,22	0,43	0,43	0,23
4. Среднеарифметические значения по показателям 2 и 3	0,41	0,51	0,56	0,37	0,51	0,41
5. Среднегеометрическое значение	0,36	0,48	0,44	0,37	0,51	0,37
6. Среднеарифметический обобщенный показатель	0,382	0,40	0,362	0,552	0,396	0,367

Для определения комплексного значения теоретической квалиметрией рекомендуется использовать несколько функций свертки: среднеарифметическая и среднегеометрическая. Последняя обеспечивает более плавное и адекватное изменение комплексного показателя в среднем диапазоне их изменения. В рассматриваемом случае можно рекомендовать именно среднегеометрическую функцию свертки.

2. Обобщенный квалиметрический показатель выбранных вариантов профилей, рассчитанный при единичном значении коэффициента весомости показывает явное преимущество двутаврового профиля, что соответствует результатам анализа прочности такого профиля. Его технологичность при выбранной схеме формообразования не намного меньше среднего значения параметра по вариантам профилей.

3. Выбранная схема построения шкал показателей, при которой за нулевую точку шкалы принимается значение соответствующего показателя тонкой пластины. Толщина и ширина пластины равны толщине и ширине элементов рассмотренных вариантов профилей. Такой подход обеспечивает широкий диапазон параметров оценки в середине шкалы. Такая шкала вполне применима для квалиметрической оценки.

4. Использование для квалиметрической оценки схемы, по которой задается определенная несущая способность, равная для всех вариантов профилей. По величине несущей способности определяются геометрические размеры профилей. Такая схема физически более понятна, дает возможность учитывать и оптимизировать количество материала, необходимого для выполнения определенной функции. Но расчет показателей качества согласно такому подходу более трудоемок.

В заключение нужно подчеркнуть, что применение квалиметрического анализа обязательно следует учитывать при конструкторской подготовке производства.

#### Символьные обозначения

$D$  – диаметр, мм;  
 $N$  – несущая способность, Н;  
 $T$  – трудоемкость изготовления, мин.

#### Перечень индексов

ср – средний;  
 конц – концевой;  
 опр – оправки;  
 кр – критический;  
 0 – базовое значение;  
 пл – пластины.

#### Перечень сокращений

КМ – композиционные материалы;  
 ЛА – летательные аппараты;  
 ПК – показатель качества;  
 КВ – коэффициент весомости.

#### Литература

- [1] Агрокваліметрія [Текст] / Ю. Г. Ковтун, Д. Г. Мазаренко, В. Т. Пестухов та ін. – Х. : ДВП «Оригінал», 2000. – 314 с.
- [2] Найзабеков, А. Б. Квалиметрия в обработке металлов давлением [Текст] : учеб. пособие / А. Б. Найзабеков, В. А. Талмазан, Н. Ю. Шмидт. Алматы : РИК по УиМЛ, 2005. – 134 с.
- [3] Квалиметрия в листовой штамповке [Текст] : учебник / М. Е. Тараненко. Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2015. 133 с.
- [4] Квалиметрия в машиностроении [Текст] : учеб. пособие / Р. М. Хвастунов, А. Н. Феофанов, В. М. Корнеева, Е. Г. Нахапетян. М. : Экзамен, 2009. – 285 с.

- [5] Тараненко И.М. Оценка температурных напряжений в профилях из композиционных материалов / И.М. Тараненко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Вып. 20(3). — Х.: ХАИ, 2000. — С.70 — 74.
- [6] Тараненко И.М. Возможности управления остаточными напряжениями в профилированных изделиях из композиционных материалов / И.М. Тараненко, М.Е. Тараненко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов. Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Вып. 34(3). — Х.: ХАИ, 2003. — С.68 — 73.
- [7] Карпов Я.С. Подход к определению напряженно-деформированного состояния стержней из композиционных материалов с учетом внутреннего саморавновешенного напряженного состояния / Я.С. Карпов, В.Н. Павленко, И.М. Тараненко // Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. журнал. — Вып. 1(68). — Х.: ХАИ, 2010. — С. 26 — 33.
- [8] Тараненко И.М. Анализ величин и характера приложения внутренних температурных усилий и оценка зоны краевого эффекта в композитных стержнях / И.М. Тараненко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Вып. 4 (72).— Х., 2012. — С. 100 — 105.
- [9] Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник [Текст] / Я.С. Карпов.— Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. — 768 с.
- [10] Бичков С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підруч. / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук, В.Д. Гречка та ін.; під ред. В.Є. Гайдачука. — К.: ІСДО, 1995. — 376 с.
- [11] Современные технологии авиационного машиностроения / Кол. авторов: под ред. А.Г. Братухина, Ю.А. Иванова. — М. Машиностроение, 1991. — 832 с.
- [12] AST Composite Wing Program — Executive Summary / The Boeing Company, Long Beach, California, fulfilled by Michael Karal, Langley Research Center, Prepared for Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-2199. — March 2001 — 98 p, Contract NAS1-20546.
- [13] Рудицин М.Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов / М.Н. Рудицин, П.Я. Артемов, М.И. Любошиц; под общ. ред. М.Н. Рудицина. — Мн.: Вышейш. шк., 1970. — 630 с.
- [14] Sascha M. Haffner. Cost Modeling and Design for Manufacturing Guidelines for Advanced Composite Fabrication: Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering; defended in June 2002 at the Massachusetts Institute of Technology; submitted to the Department of Mechanical Engineering on May 13th, 2002 / Sascha M. Haffner. — MIT, 2002. — 493 p.
- [15] Общемашиностроительные типовые нормы времени на изготовление штампов холодной штамповкой. М. НИИ Труда. — 1971. — 256 с.

*Taranenko I. M.*

National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute». Ukraine, Kharkov

### QUALIMETRIC ANALYSIS OF STRUCTURAL-MANUFACTURING SOLUTIONS OF ARTICLES FOR COMPOSITE LONGITUDINAL LOAD-CARRYING STRUCTURES OF AIRCRAFTS

*Approach for qualimetric selection and estimation functionality of cross-sectional shapes of articles for composite longitudinal load-carrying elements of aircraft structures. To conduct studies up-to-date methods of qualimetric analysis are used. Obtained results are quantitative indexes of cross-sectional shapes. Main conclusions of the paper are developing of comparative scale id indexes of properties of typical cross-sectional shapes used in aircraft engineering, obtaining of complex index of properties which includes both load-carrying ability parameter and technological parameters of shapes manufacturing.*

Keywords: *qualimetric analysis; longitudinal load-carrying elements; composite materials; aircraft structures; manufacturing technology; load-carrying ability.*

### References

- [1] Agrokvalimetrija [Tekst] / Ju. G. Kovtun, D. G. Mazarenko, V. T. Pestuhov ta in. – H.; DVP «Original», 2000. – 314 s.
- [2] Najzabekov, A. B. Kvalimetrija v obrabotke metallov davleniem [Tekst]: ucheb. posobie / A. B. Najzabekov, V. A. Tal-mazan, N. Ju. Shmidt. Almaty: RIK po UiML, 2005. – 134 p.
- [3] Kvalimetrija v listovoj shtampovke [Tekst] : ucheb. posobie / M. E. Taranenko. / H. : Nac. ajerokosm. un-t im. N. E. Zhu-kovskogo «Har'k. aviac. in-t», 2015. – 133 p.
- [4] Kvalimetrija v mashinostroenii [Tekst]: ucheb. posobie / R. M. Hvastunov, A. N. Feofanov, V. M. Korneeva, E. G. Naha-petjan. – M. : Jekzamen, 2009. – 285 p.
- [5] Taranenko I.M. Ocenka temperaturnyh naprjazhenij v profiljah iz kompozicionnyh materialov / I.M. Taranenko // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: sb. nauch. tr. Nac. ajerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 20(3). – H.: HAI, 2000. – P.70 – 74.
- [6] Taranenko I.M. Vozmozhnosti upravlenija ostatochnymi naprjazhenijami v profilirovannyh izdelijah iz kompozicionnyh materialov / I.M. Taranenko, M.E. Taranenko // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: sb. nauch. trudov. Nac. ajerokosmich. un-t im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 34(3). – H.: HAI, 2003. – P.68 – 73.
- [7] Karpov Ja.S. Podhod k opredeleniju naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija sterzhnej iz kompozicionnyh materi-alov s uchetom vnutrennego samouravnovesennogo naprjazhennogo sostojanija / Ja.S. Karpov, V.N. Pavlenko, I.M. Taranenko // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija: nauch.-tehn. zhurnal. – Vyp. 1(68). – H.: HAI, 2010. – P. 26 – 33.
- [8] Taranenko I.M. Analiz velichin i haraktera prilozhenija vnutrennih temperaturnyh usilij i ocenka zony kraevogo jeffek-ta v kompozitnyh sterzhnjah / I.M. Taranenko // Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh appa-ratov: sb. nauch. tr. Nac. ajerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 4 (72).– H., 2012. – P. 100 – 105.
- [9] Karpov, Ja.S. Proektirovanie detalej i agregatov iz kompozitov: ucheb. posobie [Tekst] / Ja.S. Karpov.– H.: Nac. ajerokosm. un-t «HAI», 2010. – 768 p.
- [10] Bichkov S.A. Tehnologija virobništva lital'nih aparativ iz kompozicijnyh materialiv: pidruch. / S.A. Bichkov, O.V. Gajdachuk, V.E. Gajdachuk, V.D. Grechka ta in.; pid red. V.E. Gajdachuka. – K.: ISDO, 1995. – 376 p.
- [11] Sovremennye tehnologii aviastroenija / Kol. avtorov: pod red. A.G. Bratuhina, Ju.A. Ivanova. – M. Mashinostroenie, 1991. – 832 p.
- [12] AST Composite Wing Program – Executive Summary / The Boeing Company, Long Beach, California, fulfilled by Michael Karal, Langley Research Center, Prepared for Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-2199. – March 2001 – 98 p, Contract NAS1-20546.
- [13] Rudicin M.N. Spravochnoe posobie po soprotivleniju materialov / M.N. Rudicin, P.Ja. Artemov, M.I. Ljuboshic; pod obshh. red. M.N. Rudicina. – Mn.: Vyshejsj. shk., 1970. – 630 p.
- [14] Sascha M. Haffner. Cost Modeling and Design for Manufacturing Guidelines for Advanced Composite Fabrication: Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering; defended in June 2002 at the Massachusetts Institute of Technology; submitted to the Department of Mechanical Engineering on May 13th , 2002 / Sascha M. Haffner. – MIT, 2002. – 493 p.
- [15] Obshhemashinostroitel'nye tipovye normy vremeni na izgotovlenie shtampov holodnoj shtampovkoj. M. NII Truda. – 1971. – 256 p.