

## **Сравнение квалиметрических показателей процессов намотки и выкладки при изготовлении профильных деталей из композиционных материалов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"*

Проведен анализ квалиметрических показателей процессов намотки и выкладки, используемых для изготовления профильных длинномерных деталей летательных аппаратов из композитов. Предложена методика численной оценки показателей качества техпроцессов производства композитных профилей. Разработаны рекомендации по учету наиболее весомых свойств процессов производства и изготавливаемых деталей, которые следует учитывать при анализе показателей качества.

**Ключевые слова:** квалиметрический анализ, намотка, выкладка, композиты, технологичность, качество.

При изготовлении профильных деталей из композиционных материалов (КМ) чаще всего используются процессы намотки, выкладки и реже пултрузии. Профильные детали – это, как правило, высоконагруженные лонжероны, балки, стрингеры, различного рода фитинги, которые при эксплуатации аэрокосмической техники находятся в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Жесткие требования к массе изделия, высокие цены армирующих и склеивающих материалов требуют реализации более плотного расположения волокон в единице поперечного сечения материала, строгого выдерживания структуры (углов армирования) материала, задаваемые конструктором. Особенности сочетания термического нагружения при формообразовании материала и реализации требуемой структуры КМ вызывают коробления деталей в процессе их изготовления и последующей сборки. Это физическое явление необходимо учитывать при выборе того или иного техпроцесса формообразования.

Широкие возможности упомянутых выше техпроцессов, а, именно: прямая, спиральная и комбинированная намотки, ручная и автоматизированная выкладки, комбинация пултрузии со спиральной намоткой – вызывают необходимость их сравнения в соответствии с разными целями. Их комплексную оценку можно провести с помощью квалиметрического анализа.

В объемных работах по технологии изготовления деталей из полимерных материалов [1, 2] приведено сравнение технико-экономических показателей ряда таких технологических процессов. Это сравнение проведено на примере изготовления панели одинарной кривизны, которая может быть использована в качестве обшивки самолета, кузовной детали автомобиля, а также другой транспортной техники (табл. 1).

Анализируя эти значения, можно сделать следующие выводы:

1. Значения показателей приведены по 10-балльной шкале, которая не совсем удобна для вычисления квалиметрических показателей. Но эти значения можно легко пересчитать в относительные единичные показатели качества (ПК). При этом следует учитывать их максимизируемый и минимизируемый характер.

2. В предложенном перечне показателей отсутствует достаточно важный показатель – КИМ. Значения КИМ достаточно просто можно оценить, рассматривая механизм формирования детали – в данном случае профильной детали.

3. Вызывает некоторые сомнения большая разница в оценке производитель-

ности процесса ручной выкладки и намотки (в 3 раза). По известным зависимостям [1-4] следует рассчитать машинное время намотки и ручной выкладки. Подробно рассматривая последовательность техпроцессов, можно оценить относительную трудоемкость этих двух техпроцессов изготовления профильной детали.

Таблица 1  
Технико-экономическая оценка способов производства изделий из армированных пластиков по 10-балльной шкале (баллы)

Процессы	Сложность изделия	Прочность изделия	Стоимость оборудования	Производительность	Квалификация рабочих
Ручная выкладка	9-10	3	1	2	10
Намотка	4	10	6	6	2
Пултрузия	2	10	7	9	2

**Трудоемкость намотки.** Для намотки профильных деталей со сложной структурой армирующего материала рационально использовать метод спиральной (косой) намотки, схема которой показана на рис. 1.

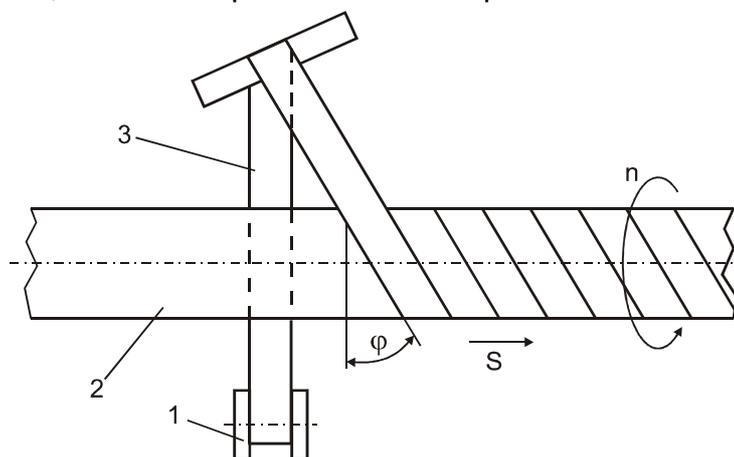


Рис. 1. Схема спиральной намотки: 1 – бобина с наматываемой лентой; 2 – оправка; 3 – наматываемая лента

Такая схема позволяет управлять углом намотки, комбинировать спирально расположенные слои армирующего материала с продольными или поперечными волокнами. При её использовании возможна намотка изделий круглого, квадратного, прямоугольного и других выпуклых форм сечений с достаточно плавными радиусами сочленения сторон изделий.

Рассматривая механизм заполнения лентой поверхности оправки легко рассчитать длительность заполнения поверхности оправки одним слоем  $T_{\text{слоя}}$  армирующего материала:

$$T_{\text{слоя}} = \frac{\Pi L_{\text{заг}}}{V_{\text{вх}} b}, \quad (1)$$

где  $\Pi$  – периметр сечения оправки;  $V_{\text{вх}}$  – скорость входа ленты армирующего материала на оправку;  $L_{\text{заг}}$  – длина заготовки;  $b$  – ширина армирующей ленты.

Управляемым технологическим параметром в этой зависимости является

скорость  $V_{ex}$ . Рекомендации по выбору его значений лежат в достаточно широком диапазоне – от 0,24 [1] до 18 м/мин для некоторых типов намоточных станков [3]. Практика намотки цилиндрических баллонов [5] приводит к выводу о принятии к расчету более высоких значений скоростей вплоть до значений, при которых с “мокрой” обмотанной поверхности оправки начнут срываться капли связующего под действием центробежных сил.

Вторым важным технологическим параметром является определение необходимой длины оправки (или длины заготовки). Анализ схемы укладки армирующего материала показывает, что на начальном и конечном концах оправки остаются участки с нерегулярной структурой заполнения слоев. Длина таких участков определяется периметром оправки, углом армирования волокон, шириной армирующей ленты, а при перекрытии слоев – также величиной перекрытия. Необходимую длину наматываемой заготовки  $L_{заг}$  с регулярной структурой следует вычислять так:

$$L_{заг} = L_{дет} + 2P \operatorname{tg} \varphi + \frac{b}{\cos \varphi} + L_{пр}, \quad (2)$$

где  $L_{дет}$  – длина детали;  $\varphi$  – угол армирования материала;  $L_{пр}$  – длина припусков.

В этой формуле второе и третье слагаемые определяют длину (с двух сторон) нерегулярных участков, а припуски необходимы для закрепления начальных участков наматываемой ленты, на них может скапливаться дополнительное связующее, выдавливаемое уложенными витками ленты, и другие дефекты, из-за несовершенства процесса. Длину припусков обычно принимают в размере 5...10 % от длины детали суммарно на две стороны оправки.

Анализ этой зависимости показывает, что спиральная намотка коротких изделий с большим периметром сечения менее эффективна, чем для длинных. При необходимости изготовления коротких деталей следует совмещать намотку нескольких деталей на одной оправке. Это обеспечивает получение более высоких значений КИМ.

При намотке профильных деталей со значительным изменением периметра сечения вдоль длины детали (концевые участки лонжеронов и нервюр, стрингеры и балки переменного сечения) возникает необходимость уменьшения периметра (массы) подаваемого в обмотку материала (армирующего материала и связующего). Подача материала на участки с меньшим периметром сечения от больших периметров приводит к образованию складок и наплывов.

В этом случае применение комбинации намотки и выкладки монослоев снижает вероятность возникновения указанных нарушений формы и структуры. Укладкой монослоев соответствующей структуры можно компенсировать уменьшение периметра сечения. Для профильных деталей с уменьшающимся периметром вдоль продольной оси можно рекомендовать управление скоростью подачи наматываемого материала и шагом укладки слоев.

Для оценки трудоемкости (производительности) намотки и выкладки рассмотрим пример изготовления квадратного профиля со стороной 50 мм и длиной 1 м. Ширина наматываемой ленты – 10 мм, угол укладки – 45°. Расчетная длина заготовки (2):

$$L_{заг} = 1,0 + 2 \cdot 0,2 \cdot 1,0 + \frac{0,1}{0,71} \approx 1,4 \text{ м.}$$

Машинное время  $T_m$  для образования одного слоя:

– для  $V_{ex}=1$  м/мин  $T_m=0,2 \cdot \frac{1,4}{0,01}=28$  мин, скорость вращения 7,6 об/мин;

– для  $V_{ex}=10$  м/мин  $T_m=2,8$  мин, скорость вращения 76 об/мин.

Машинное время намотки 20 слоев – 56 мин, вспомогательное время (10 %) – 5,6 мин. Итого: 61,5 мин.

Скорость намотки выбрана средней из диапазона 0,24...18 м/мин. Это обеспечивает относительно спокойные и стабильные условия укладки без существенного влияния инерционных сил.

**Трудоемкость выкладки.** Для сравнения процессов по параметрам трудоемкости изготовления детали рассмотрим трудоемкость аналогичной детали квадратного сечения со стороной 50 мм, длиной 1,0 м и толщиной стенки 2,0 мм. Деталь выполняется из 20 слоев армирующего материала толщиной 0,1 мм и углом армирования 45°.

Расчетная длина заготовки – 1,1 м. Машинное время выкладки одного слоя на гладкой поверхности площадью  $S=0,5 \cdot 11=5,5$  дм<sup>2</sup> определяется по формуле [2]

$$T_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4 \cdot A \cdot S}}{2A},$$

где  $A=4,2 \cdot 10^{-2}$ ;  $B=4,5$  – эмпирические коэффициенты.

Время выкладки одного слоя на одной поверхности – 1,21 мин, время выкладки четырех поверхностей – 4,84 мин, время выкладки 20 слоев – 96,8 мин.

Вспомогательное время, затрачиваемое на перекрытие ребер оснастки и слоев армирующего материала, контроль и прикатку, составляет 1,5...2,5 от времени выкладки и принимается равным 48 мин. В результате, время, затрачиваемое на укладку, равно 144,8 мин. Таким образом, трудоемкость выкладки превышает время намотки в ~2,35 раза при изготовлении относительно простой детали.

Показатели этого сравнения близки к приведенным в табл. 1, а именно: 2,35 и 3,0 для профильной детали и панели одинарной кривизны.

Сравним другие показатели процесса. Для проведения техпроцесса выкладки необходима оснастка, состоящая из гладкой оправки и четырех цулаг. Оправка практически одинакова (по конструкции) с оправкой для намотки. Изготовление цулаг из листового материала по трудоемкости минимально и они применяются многократно. Поэтому перенесение трудоемкости их изготовления на трудоемкость изготовления детали пренебрежимо мало.

Коэффициент использования материала (КИМ) при намотке несколько больше аналогичного показателя при выкладке. При её осуществлении длина заготовки с припусками на обрезку составляет 10 % длины.

При намотке продольной детали припуск на обрезку нерегулярной структуры и нарушение толщины стенки детали зависит от угла намотки, периметра профиля сечения и ширины ленты (см. формулу (2)) и при расчете составила 40 % длины детали.

Условно можно принять, что КИМ выкладки – 0,9, а намотки – 0,55...0,75. Для его увеличения рационально объединить на одном инструменте две и более детали.

Сравним квалитетические показатели процессов намотки и выкладки. Отметим, что при квалитетическом анализе желательно принимать во внимание 5–7 наиболее влиятельных показателей процесса. При таком анализе необходимо учитывать возможность реализации заданной схемы армирования, объемного содержания композита и их степень натяжения.

Исходя из этих соображений Г. С. Головкин [1] строит предпочтительную последовательность выбора техпроцессов изготовления деталей: автоматизированная намотка, пултрузия (может сочетаться с намоткой), ручная выкладка (предпочтительнее механизированная) и напыление.

Для учета технико-экономических показателей процесса в формировании деталей автором приведена табл. 1 с рядом таких показателей, представленных по 10-балльной шкале. Эти значения можно легко привести к относительным показателям качества [6], но при этом учитывать их максимизируемый или минимизируемый характер, а также заменив для простоты учета 10-балльной оценки на 9-балльные (таблица 2).

Таблица 2

Некоторые показатели качества  $K_i$  процессов формирования деталей из армированных пластиков (пересчитано по табл. 1) [1]

Процесс	Сложность изделия	Прочность изделия	Стоимость оборудования	Производительность*	Квалификация рабочих	КИМ**
Ручная Выкладка	0,9	0,3	0,9	0,2	0,1	0,95
Намотка	0,4	0,9	0,4	0,6	0,8	0,65
Пултрузия	0,2	0,9	0,3	0,9	0,8	–

\* Рассчитанные автором значения производительности намотки и выкладки отличаются только в 1,7 раза для названной детали.

\*\* Средние значения для квадратного профиля с углом армирования, рассчитанным автором.

Комплексный показатель качества, учитывающий основные особенности процессов, в первом приближении, как среднеарифметическое значение единичных показателей свойств в их рассматриваемой среде. Весомость каждого единичного свойства определяется коэффициентом весомости (табл. 3).

Таблица 3

Экспертная оценка весомости единичных показателей  $g_i$  свойств процессов изготовления профильных деталей из КМ

Показатели	Сложность изделия	Прочность изделия	Стоимость оборудования	Производительность	Квалификация рабочих	КИМ
Эксперт 1	0,8	0,9	0,4	0,3	0,6	0,5
Эксперт 2	0,3	0,9	0,5	0,5	0,4	0,3
Эксперт 3	0,7	0,8	0,4	0,4	0,6	0,7
Среднее значение	0,6	0,87	0,43	0,4	0,53	0,5

Совокупность значений  $K_i$  и  $g_i$  представлены в табл. 4. Индекс "i" относится к перечню свойств процессов формирования.

Таблица 4

Значения  $K_i \cdot g_i$  по вариантам техпроцессов

Процесс	Сложность изделия	Прочность изделия	Стоимость оборудования	Производительность*	Квалификация рабочих	КИМ**
Ручная Выкладка	0,54	0,26	0,39	0,08	0,05	0,48
Намотка	0,24	0,78	0,17	0,24	0,42	0,32
Пултрузия	0,12	0,78	0,13	0,36	0,42	–

\* Рассчитанные автором значения производительности намотки и выкладки отличаются только в 1,7 раза для названной детали.

\*\* Средние значения для квадратного профиля с углом армирования, рассчитанным автором.

Значение комплексного показателя качества  $K^{КОМП}$  можно оценить по формуле:

$$K^{КОМП} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i \cdot K_i}{n},$$

где  $g_i$  и  $K_i$  – единичные коэффициенты весомости и качества показателей технологий.

В результате расчета комплексного показателя качества процессов формирования панелей одинарной кривизны и профильных деталей из КМ получено:

– для ручной выкладки  $K_в^{КОМП} = 0,3$ ;

– для намотки  $K_н^{КОМП} = 0,36$ ;

– для пултрузии  $K_п^{КОМП} = 6,68$ .

Анализ этих значений  $K^{КОМП}$  и значений, представленных в табл. 4, показывает, что свойство “сложность изделия” больше относится к самой общей характеристике формования, несмотря на то, что в работе [1] задекларирована привязка к формованию панели одинарной кривизны. Они по геометрии могут быть сложными, с различного рода локальными элементами и гладкими небольшой кривизны. В рассматриваемом случае анализа изучается процесс формования профильных деталей, которые в своей номенклатурной массе имеют совершенно иную, простую форму, но протяженные вдоль одной оси. Поэтому, в качестве предположения можно исключить из рассмотрения свойство “сложность изделия”. Все остальные свойства в первом приближении важны для анализа процессов изготовления профильных деталей.

После соответствующих вычислений получаем:

– для ручной выкладки  $K_в^{КОМП} = 0,25$ ;

– для намотки  $K_н^{КОМП} = 0,39$ ;

– для пултрузии  $K_п^{КОМП} = 0,42$ .

Таким образом, квалитетический анализ изготовления профильных деталей в двух вариантах показывает такую последовательность процессов, расположенную по мере убывания комплексного показателя качества: пултрузия, намотка, ручная выкладка. Эта последовательность в значительной мере определяется производительностью процессов. Приведенный выше расчет машинного времени для намотки и выкладки подтверждает более высокую производительность первого процесса.

### Список литературы

1. Головкин, Г. С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов / Г. С. Головкин. М.: Химия, Колос.С, 2007. – 399 с.

2. Качество и сертификация промышленной продукции: учеб. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. М. Рябченко. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1998. – 396 с.

3. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підруч. / С. А. Бичков, О. В. Гайдачук, В. Є. Гайдачук та ін. Під ред. В. Є. Гайдачука. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

4. 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.

5. Ивановский, В.С. Композитный баллон с полимерным лайнером/ В. С. Ивановский, Р.В. Смирнов // Композиционные материалы в промышленности: докл. 26-й междунар. конф. – Ялта, Крым, 2006. – С. 301 – 302.

6. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения; введ. 01.07.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 39 с.

Поступила в редакцию 06.06.2016

### **Порівняння кваліметричних показників процесів намотки та викладки при виготовленні профільних виробів із композиційних матеріалів**

Проведено аналіз кваліметричних показників процесів намотування та викладення, що використовуються для виготовлення профільних довгомірних деталей літальних апаратів з композитів. Запропоновано методику чиселового оцінювання показників якості технологічних процесів виробництва композитних профілів. Розроблено рекомендації щодо урахування таких найбільш вагомих властивостей процесів виробництва і деталей, що й виготовляються, як складність і міцність виробу, вартість виробничого устаткування, продуктивність процесу й кваліфікація робітників, які слід урахувати при аналізі показників якості.

**Ключові слова:** кваліметричний аналіз, намотування, викладення, композити, технологічність, якість.

### **Comparison of Qualimetric Indexes of Processes of Winding and Laying-up at Manufacturing of Composite Sections**

Analysis of qualimetric indexes for winding and laying-up processes used for manufacturing of composite longitudinal articles of aircrafts is conducted. The method of numerical evaluation of quality indexes for technological processes of composite sections manufacturing is suggested. Recommendations concerning such the most valuable properties of production processes and components as complexity and strength of an article, the cost of manufacturing equipment, manufacturability of production process and qualification of operators that should be considered at quality analyzing are developed.

**Keywords:** qualimetric analysis, winding, laying-up, composites, manufacturability, quality.

#### **Сведения об авторе:**

**Тараненко Игорь Михайлович** – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры композитных конструкций и авиационного материаловедения Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина.